



Filipe Bacalhau Guerreiro Amado

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Estudo numérico do escoamento numa chaminé como ventilador estático

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: José M. P. Conde, Professor Auxiliar, FCT-UNL
Co-orientador: José F. A. Dias, Professor Associado, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João José Lopes Carvalho
Vogais: Prof. Doutor Eric Lionel Didier
Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde
Prof. Doutor José Fernando Almeida Dias



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Setembro 2011

Estudo numérico do escoamento numa chaminé como ventilador estático

Copyright ©2011 de Filipe Bacalhau Guerreiro Amado, FCT/UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A finalização desta dissertação representa o culminar de mais uma etapa da minha vida. Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me acompanharam ao longo de todo o meu percurso académico e me deram força e motivação para atingir este objectivo.

Aos meus pais, que me possibilitaram todo este percurso escolar, pois sem eles nada disto seria possível.

Aos professores José Manuel Paixão Conde e José Fernando de Almeida Dias pelo tempo dispendido na orientação e por todo o conhecimento que me foi transmitido ao longo da realização deste trabalho.

A todos os meus colegas e amigos.

O meu especial agradecimento ao colega Moisés Brito por ter despendido algum do seu tempo e por todos os conhecimentos que me transmitiu acerca dos programas *GAMBIT*, *FLUENT*, entre outras coisas.

Resumo:

No presente trabalho, é feita a análise numérica de um escoamento em torno de uma chaminé cilíndrica, com a finalidade de comparar os resultados obtidos num trabalho experimental, e deste modo validar a utilização do modelo numérico utilizado na simulação

As simulações foram realizadas com recurso aos softwares de modelação e simulação numérica: *GAMBIT* (versão 2.2.30) e *FLUENT* (versão 6.3.26). O primeiro é orientado para a construção das malhas, o segundo importa as malhas permitindo alterar alguns parâmetros (condições de fronteira, modelo de turbulência, algoritmo de acoplamento, algoritmo de discretização, entre outras opções), para posteriormente realizar as simulações. Este software utiliza o método de volumes finitos para resolver as equações de Navier-Stokes com um método de acoplamento parcial entre pressão e velocidade.

Neste trabalho são traçadas as curvas de funcionamento para vários modelos de turbulência ($k-\varepsilon$ Standard, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\varepsilon$ Realizable, $k-\omega$ Standard e $k-\omega$ SST) e 6 malhas diferentes. Concluiu-se que os modelos de turbulência que apresentaram uns resultados mais semelhantes aos experimentais foram os modelos $k-\varepsilon$ Standard e $k-\omega$ SST.

Analisando os planos de simetria longitudinais e os planos de corte transversais para os casos estudados, pode-se compreender o comportamento do escoamento desde o interior da chaminé até a altura em que saí e entra em interacção com o escoamento proveniente da entrada do túnel de vento.

Concluiu-se com este trabalho que foi possível reproduzir o trabalho experimental desenvolvido no túnel de vento embora com alguns erros de precisão inerentes.

Palavras-chave: Túnel de vento, chaminé cilíndrica, ventilação natural, modelos de turbulência, CFD, *FLUENT*.

Abstract:

In this work, numerical analysis is made of a flow around a cylindrical chimney, in the order to compare the results obtained in experimental work, and thus validate the use the numerical model used in the simulation.

The simulations were realized using the modeling and numerical simulation software: *GAMBIT* (version 2.2.30) and *FLUENT* (version 6.3.26). The first is oriented towards the construction of meshes, the second one makes the importation of meshes and allow to changing some parameters (boundary conditions, turbulence model, coupling algorithm, discretization algorithm, among other options), to after carry out the simulations. This software uses the finite volume method to solve the Navier-Stokes method with a partial coupling between pressure and velocity.

In this work the operating curves were drawn for various models of turbulence (k - ε Standard, k - ε RNG, k - ε Realizable, k - ω Standard and k - ω SST) and 6 different meshes. It was concluded that the turbulence models that showed results more similar to experimental work were models k - ε Standard and k - ω SST.

By analyzing the symmetry planes of longitudinal and transverse cutting planes for the cases studied, can be understood the behavior of flow from inside the chimney until the time it left, and enter into interaction with the flow from the entrance of the tunnel wind.

It was concluded with this work that has been possible to reproduce the experimental work carried out in the wind tunnel although with some precision errors inherent.

Keywords: Wind tunnel, cylindrical chimney, natural ventilation, turbulence models, *CFD*, *FLUENT*.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Revisão bibliográfica	1
1.3. Objectivos	2
1.4. Estrutura da dissertação	2
Capítulo 2 - Modelação numérica	5
2.1. Equações de Navier-Stokes para um fluido newtoniano	5
2.2. Turbulência	5
2.3. Modelação de turbulência	6
2.4. Modelos de turbulência	6
2.4.1. Modelo $k-\varepsilon$ Standard	6
2.4.2. Modelo $k-\varepsilon$ RNG	7
2.4.3. Modelo $k-\varepsilon$ Realizable	8
2.4.4. Modelo $k-\omega$ Standard	9
2.4.5. Modelo $k-\omega$ SST	10
Capítulo 3 - Discretização do domínio	11
3.1. Construção da malha	11
3.2. Malhas 3D	12
Capítulo 4 - Dados experimentais	17
4.1. Montagem experimental	17
4.2. Ensaios	Erro! Marcador não definido.
Capítulo 5 - Dados numéricos das simulações	21
5.1. Esquema numérico	21
5.1.1. Modelos numéricos	21

5.1.2. Acoplamento pressão-velocidade.....	21
5.1.3. Discretização	21
5.2. Condições de funcionamento	22
5.3. Condições de fronteira	23
5.4. Dados de velocidade e pressão	23
5.5. Critério de convergência	25
Capítulo 6 - Resultados numéricos.....	27
6.1. Comparação dos resultados experimental vs. computacional.....	27
6.2. Análise da evolução do escoamento ao longo eixo U_c/U_v	29
6.3. Coeficiente de pressão vs. altura adimensional da chaminé	38
Capítulo 7 - Conclusões.....	43
Referências Bibliográficas	47
Anexos.....	49
Anexo A.....	49
Anexo B	57
Anexo C	63

Índice de Figuras

Figura 3.1 - Dimensão do domínio de cálculo tridimensional.....	12
Figura 3.2a - Discretização no topo da chaminé, malha 4.....	13
Figura 3.2b - Discretização no topo da chaminé, malha 2.....	13
Figura 3.2c - Discretização no topo da chaminé, malha 1.....	13
Figura 3.2d - Discretização no topo da chaminé, malha 3.....	13
Figura 3.2e - Discretização no topo da chaminé, malha 5.....	13
Figura 3.2f - Discretização no topo da chaminé, malha 6.....	13
Figura 3.3 - Pormenor da malha 4, corte num plano horizontal.....	14
Figura 3.4 - Pormenor da malha 4, corte no plano de simetria.....	14
Figura 3.5 - Discretização da malha 1.....	15
Figura 4.1 - Dimensões da chaminé.....	17
Figura 4.2 - Montagem experimental.....	18
Figura 4.3 - Representação da curva de funcionamento experimental para C_{p6}	20
Figura 5.1 - Volume de controlo unidimensional (adaptado de Pitarma, 2003).....	22
Figura 6.1 - Comparação entre as 4 malhas ($k-\varepsilon$ Standard).....	27
Figura 6.2 - Comparação entre as 4 malhas ($k-\omega$ SST).....	28
Figura 6.3 - Comparação entre as malhas 3, 5 e 6 ($k-\omega$ SST).....	28
Figura 6.4 - Análise de alguns casos presentes na curva de funcionamento.....	29
Figura 6.5 - Corte de simetria do caso 24.....	30
Figura 6.6 - Caso 24, corte em $Z=0,32\text{m}$	30
Figura 6.7 - Caso 24, corte em $Z=0,35\text{m}$	30
Figura 6.8 - Corte de simetria do caso 11.....	31
Figura 6.9 - Caso 11, corte em $Z=0,2655\text{m}$	31

Figura 6.10 - Caso 11, corte em $Z=0,30975\text{m}$	31
Figura 6.11 - Corte de simetria do caso 12.....	32
Figura 6.12 - Corte de simetria do caso 13.....	32
Figura 6.13 - Corte de simetria do caso 14.....	32
Figura 6.14 - Corte de simetria do caso 18.....	33
Figura 6.15 - Caso 12, corte em $Z=0,23\text{m}$	33
Figura 6.16 - Caso 12, corte em $Z=0,32\text{m}$	33
Figura 6.17 - Caso 13, corte em $Z=0,28\text{m}$	34
Figura 6.18 - Caso 13, corte em $Z=0,35\text{m}$	34
Figura 6.19 - Caso 14, corte em $Z=0,35\text{ m}$	34
Figura 6.20 - Caso 18, corte em $Z=0,32\text{m}$	34
Figura 6.21 - Corte de simetria do caso 19.....	35
Figura 6.22 - Caso 19, corte em $Z=0,32\text{m}$	35
Figura 6.23 - Corte de simetria do caso 20.....	36
Figura 6.24 - Caso 20, corte em $Z=0,31\text{m}$	36
Figura 6.25 - Corte de simetria do caso 22.....	37
Figura 6.26 - Caso 22, corte em $Z=0,35\text{ m}$	37
Figura 6.27 - Variação do C_{P6} com a altura adimensional para o caso 11.....	39
Figura 6.28 - Variação do C_{P6} com a altura adimensional para o caso 12.....	40
Figura 6.29 - Variação do C_{P6} com a altura adimensional para o caso 13.....	41
Figura 6.30 - Variação do C_{P6} com a altura adimensional para o caso 14.....	42

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Número de elementos das malhas tridimensionais.....	13
Tabela 4.1 - Valores experimentais da velocidade e do Reynolds.....	19
Tabela 4.2 - Valores experimentais da pressão.....	20
Tabela 5.1a - Condições de fronteira.....	23
Tabela 5.1b - Condições de fronteira.....	23
Tabela 5.2 - Dados das velocidades impostas na entrada da chaminé e do túnel de vento.....	24
Tabela 5.3 - Dados da pressão imposta na entrada da chaminé e da velocidade imposta na entrada do túnel de vento.....	24
Tabela 5.4 - Condições iniciais da turbulência.....	24
Tabela 6.1 - Erros relativos do caso 11.....	39
Tabela 6.2 - Erros relativos do caso 12.....	40
Tabela 6.3 - Erros relativos do caso 13.....	41
Tabela 6.4 - Erros relativos do caso 14.....	42

Simbologias e Notações

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	constante do modelo $k - \varepsilon$ para a taxa de dissipação turbulenta
C_p	Coeficiente de pressão
C_μ	constante de proporcionalidade para a viscosidade dinâmica turbulenta
D	diâmetro da chaminé
D_ω	termo de difusão cruzada
D_ω^+	porção positiva do termo de difusão cruzada
g_i	componente da aceleração gravítica segundo o vector i
G_k	geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade
\tilde{G}_k	geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade
G_ω	geração de ω
k	energia cinética turbulenta
L	altura da chaminé
L_1	altura do túnel de vento
p	pressão
Pr_t	número de Prandtl turbulento para a energia
t	tempo
y	distância até à parede
Y_k	dissipação de k devido à turbulência
Y_ω	dissipação de ω devido à turbulência
S_k	termo fonte de k
S_ε	termo fonte de ε
S_ω	termo fonte de ω
U_c	velocidade na entrada da chaminé
U_v	velocidade na entrada do túnel de vento

u	componente da velocidade segundo x
v	componente da velocidade segundo y
w	componente da velocidade segundo z
ΔP	variação de pressão
σ_k	número de Prandtl turbulento para k
σ_ε	número de Prandtl turbulento para ε
α_k	inverso do número de Prandtl para k
α_ε	inverso do número de Prandtl para ε
α_s	constante do remoinho que assume diferentes valores dependendo se o escoamento do remoinho é dominada ou apenas roda suavemente
β	coeficiente de expansão térmica
ε	taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
μ_{eff}	viscosidade efectiva
μ_t	viscosidade turbulenta
μ_{t0}	viscosidade turbulenta calculada sem modificação do remoinho
ρ	massa volúmica do fluido
Ω	característica do numero de remoinhos
$\overline{\Omega_{ij}}$	representa a taxa média de rotação do tensor visualizado no referencial em rotação
ω	taxa específica de dissipação
ω_k	velocidade angular
Γ_k	difusibilidade efectiva de k
Γ_ω	difusibilidade efectiva de ω

Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
<i>CFD</i>	Dinâmica de Fluidos Computacional (do inglês “ <i>Computational Fluid Dynamics</i> ”)
<i>FCT</i>	Faculdade de Ciências e Tecnologia
<i>IC</i>	(do inglês “ <i>Interval Count</i> ”)
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>MUSCL</i>	(do inglês “ <i>Monotonic Upstream Scheme for Conservation Laws</i> ”)
<i>NITA</i>	(do inglês “ <i>Non-Iterative Time Advancement</i> ”)
<i>PRESTO</i>	(do inglês “ <i>PREssure STaggering Option</i> ”)
<i>QUICK</i>	(do inglês “ <i>Quadratic Upstream Interpolation for the Convection Kinematics</i> ”)
<i>RANS</i>	Equações médias de Navier-Stokes (do inglês “ <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> ”)
<i>SIMPLE</i>	(do inglês “ <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i> ”)
<i>SIMPLEC</i>	(do inglês “ <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent</i> ”)

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

O uso da ventilação natural nos dias que correm é um factor a ter em conta para garantir a optimização do conforto no interior dos edifícios, contribuindo para a extracção de poluentes do ar interior, produzidos pelo corpo humano e pelo próprio edifício e para uma melhoria do conforto térmico do espaço. A ventilação natural possibilita também uma redução dos consumos energéticos face à ventilação forçada, onde a ventilação é feita com recurso a meios mecânicos, como é o caso dos aparelhos de ar condicionado. A ventilação natural resulta do efeito da diferença de pressões entre as diferentes fachadas do espaço, diferenças estas resultantes da acção do vento e dos gradientes de temperatura existente entre o interior e o exterior.

Dentro de ventilação natural existem várias variantes, todas elas com a mesma finalidade mas com diferentes formas de funcionamento, como é o caso dos captadores de vento (do inglês Windcatchers) (Huynh, 2010; Montazeri, 2010; Jones, 2010), ventiladores estáticos (Pfeiffer, 2007; Loureiro, 2008), chaminés solares (Chen, 2002; Lee, 2008) e as chaminés convencionais (Dias Delgado, 1996).

Este trabalho enquadra-se no último tipo de ventilação natural mencionado, nas chaminés cilíndricas e no seu comportamento. Apesar de constituir um problema clássico da mecânica dos fluidos, o escoamento ao redor de cilindros apresenta um carácter desafiador, devido à sua alta complexidade. Do ponto de vista prático, diversas estruturas empregadas na engenharia funcionam como corpos cilindros imersos em escoamentos de fluidos tais como: edifícios, plataformas de extracção petrolífera - “risers”, oleodutos, etc.

1.2. Revisão bibliográfica

Durante a revisão bibliográfica, não foi encontrado nenhum trabalho que tratasse da influência de escoamentos em torno de chaminés cilíndricas, no entanto existem alguns estudos de escoamentos ao redor de cilindros e ventiladores estáticos. Não obstante, uma vez que se trata de um fenómeno semelhante, estes trabalhos foram analisados.

No site da organização sem fins lucrativos wood heat (<http://woodheat.org>, 2011) foi publicado um artigo denominado “how wind affects chimneys performance” onde se afirma que uma chaminé sem cobertura está mais vulnerável aos efeitos adversos do vento. As coberturas, particularmente aquelas que têm deflectores podem prevenir o acesso directo do vento na entrada, fornecendo uma protecção significativa aos efeitos adversos do vento. A pesquisa deste autor mostrou que as coberturas com deflectores podem melhorar o funcionamento das chaminés, independentemente da direcção do vento.

Wong (2004) realizou um estudo onde faz a comparação entre os resultados experimentais e os dados obtidos através de simulação em *CFD*, sobre o efeito de chaminé para o aumento da ventilação natural num apartamento em Singapura. Concluindo que o efeito de

chaminé contribui significativamente para o aumento da ventilação do apartamento entre 47% e 54%.

No contexto dos ventiladores estáticos, Loureiro (2008) realizou a caracterização do comportamento de ventiladores estáticos, onde apresenta o estudo experimental de dois modelos de ventiladores estáticos existentes no mercado. Este estudo teve como principal objectivo discutir e comparar o desempenho dos ventiladores, no que respeita à capacidade de extracção e à capacidade de se opor ao escoamento, com base nestes dados foram traçadas as curvas características para os dois modelos de ventiladores estudados.

1.3. Objectivos

A elaboração desta dissertação de mestrado tem como principal objectivo verificar até que ponto se consegue atingir valores tão próximos quanto possível dos experimentais (José Dias *et al.*, comunicação privada), e deste modo validar a utilização do modelo numérico utilizado na simulação. Para além de verificar a viabilidade da utilização das instalações do túnel de vento face aos dados numéricos obtidos através dos programas de simulação numérica de dinâmica dos fluidos computacional.

Inicialmente, com recurso do software *GAMBIT* versão 2.2.30 (Gambit 2.2, 2004) pretende-se fazer a construção de uma malha em 2D, para assim poder ter uma ideia dos locais onde será necessário fazer uma melhor afinação da malha, e posteriormente passar para um modelo 3D no qual este estudo se baseia, podendo poupar nos elementos e no tempo de cálculo.

Após a construção da malha, esta é importada para o software *FLUENT* versão 6.3.26 (Fluent 6.3, 2006) onde serão seleccionadas as condições de fronteira (velocidade e pressão), escolha do modelo de turbulência e dos algoritmos de discretização e de acoplamento pressão-velocidade de modo a ser possível reproduzir o ensaio experimental no interior do túnel de vento.

O propósito principal será analisar que malha e que modelo de turbulência melhor se adapta aos resultados do trabalho experimental.

1.4. Estrutura da dissertação

Na introdução, capítulo 1, são apresentadas as motivações, a revisão bibliográfica, os objectivos e as metodologias que estiveram na base do trabalho. É também apresentada a organização da dissertação.

No capítulo 2, modelação numérica, faz-se uma breve introdução às equações de Navier-Stokes. É introduzido também o conceito de turbulência e é feita uma abordagem sobre os modelos de turbulência utilizados neste estudo.

O capítulo 3, discretização do domínio, apresenta o processo de criação das malhas tridimensionais, descrição das dimensões do domínio, apresentação do número de

elementos total de cada malha e o número total de elementos que compõem o tecto do túnel e da chaminé.

O capítulo 4 contém uma breve explicação sobre todos os dados experimentais assim como uma descrição de todos os instrumentos utilizados e a apresentação dos resultados obtidos.

O capítulo 5, é referente aos dados numéricos das simulações feitas nos programas de simulação numérica, onde são descritas as opções escolhidas, condições de fronteira aplicadas, velocidades e pressões admitidas. É também feita a abordagem do esquema numérico, isto é sobre o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade e sobre o esquema de discretização utilizados.

O capítulo 6 trata da análise dos resultados numéricos e a comparação com os resultados do trabalho experimental, assim como a escolha da malha e o modelo de turbulência que melhor se adapta a este estudo comparativo.

Por fim no capítulo 7, são apresentadas as conclusões que foram sendo tiradas no decorrer de uma análise global deste trabalho e foram ainda feitas sugestões para elaboração de trabalhos futuros nesta mesma área de estudo.

Capítulo 2

Modelação numérica

2.1. Equações de Navier-Stokes para um fluido newtoniano

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem a velocidade e pressão do fluido num determinado ponto do tempo e do espaço. São complementadas pela equação da conservação da massa, também chamada de equação da continuidade. Geralmente, o termo “equações de Navier-Stokes” é usado para se referir a todas estas equações (White, 1999).

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.1a)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.1b)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.1c)$$

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Neste trabalho o escoamento está em regime estacionário e $\partial u / \partial x = 0$. O fluido é isotérmico e incompressível.

2.2. Turbulência

Todos os escoamentos encontrados em engenharia, tornam-se turbulentos a partir de certo número de Reynolds (UL/ν onde U e L são características de velocidade e de comprimento do escoamento médio e ν é a viscosidade cinemática). A baixos números de Reynolds o escoamento é laminar. A altos números de Reynolds observa-se que o escoamento se torna turbulento. A situação caótica e aleatória de movimento em que se desenvolve a velocidade e a pressão varia continuamente com o tempo dentro de regiões de escoamento substancial. Em casos simples, as equações de Navier-Stokes (2.1a-2.1c) e a equação da continuidade (2.2), podem ser resolvidas analiticamente. Em escoamentos mais complexos podem ser resolvidos numericamente com técnicas *CFD* como o método dos volumes finitos. Muitos, se não a maioria, dos escoamentos em engenharia são turbulentos, de modo que os escoamentos em regime turbulento não são apenas de interesse teórico (Versteeg e Malalasekera, 1995)

2.3. Modelação de turbulência

A maioria dos escoamentos inclui estruturas turbulentas que não podem ser facilmente resolvidas numericamente, de modo a simplificar, os métodos do *CFD* resolvem as equações médias de Reynolds (*RANS*) (2.1a-2.1c) usando os modelos de turbulência para calcular as tensões turbulentas médias (Versteeg e Malalasekera, 1995).

$$div(\rho U \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + div(\mu grad U) + \left[-\frac{\partial (\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_{M_x} \quad (2.3a)$$

$$div(\rho V \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + div(\mu grad V) + \left[-\frac{\partial (\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{M_y} \quad (2.3b)$$

$$div(\rho W \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + div(\mu grad W) + \left[-\frac{\partial (\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{M_z} \quad (2.3c)$$

Um modelo de turbulência pode ser descrito como um conjunto de relações e equações necessárias para determinar as correlações turbulentas desconhecidas que surjam num escoamento.

2.4. Modelos de turbulência

Existem vários modelos de turbulência, na maioria dos casos de convecção natural faz-se uso do modelo de turbulência $k-\varepsilon$, no presente trabalho utilizam-se três variantes, Standard, RNG e Realizable. Todos os três modelos têm formas semelhantes, com equações de transporte de k e ε , as principais diferenças nos modelos serão enumeradas mais à frente.

Outro modelo existente é o modelo $k-\omega$, neste trabalho foram utilizadas duas variantes, Standard e SST. Ambos os modelos têm formas semelhantes, com equações de transporte de k e ω , as principais formas em que o modelo SST difere do modelo Standard serão referidas nos pontos seguintes.

2.4.1. Modelo $k-\varepsilon$ Standard

Este modelo é usado para prever a maioria dos escoamentos turbulentos devido à sua robustez, economia e previsão razoável para uma vasta gama de escoamentos. As suas principais vantagens são o cálculo rápido, estável, e os resultados razoáveis para muitos escoamentos, especialmente aqueles com altos números de Reynolds. Este modelo não é

recomendado para escoamentos com muitos remoinhos, jactos circulares ou escoamentos com forte separação do escoamento (Bakker e Marshall, 2004).

O modelo de turbulência k - ε standard é constituído por duas equações (2.4a - 2.4b), uma para k e outra para ε correspondente à energia cinética turbulenta e à sua taxa de dissipação. O modelo da equação de transporte para k é derivado da equação exacta, enquanto o modelo da equação de transporte para ε é obtida usando raciocínio físico. No cálculo do modelo k - ε standard, assumiu-se que o escoamento é completamente turbulento e que os efeitos da viscosidade molecular são desprezáveis (Versteeg e Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.4a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.4b)$$

Onde a viscosidade turbulenta é expressa pela seguinte expressão:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

As equações contêm cinco constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k e σ_ε , que têm os seguintes valores padrão:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (2.6)$$

2.4.2. Modelo k - ε RNG

Este modelo é uma versão modificada do modelo k - ε (Bakker e Marshall, 2004). Foi obtido a partir das equações instantâneas de Navier-Stokes, usando uma técnica matemática rigorosa chamada “Renormalization group theory” (RNG). É semelhante ao modelo k - ε standard mas inclui os seguintes refinamentos (Fluent 6.3, 2006):

- O modelo RNG contém um termo adicional na equação de ε que melhora significativamente a sua precisão para escoamentos com tensões rapidamente aplicadas.
- O efeito de remoinho na turbulência está incluído no modelo RNG, este modelo oferece melhores resultados para os escoamentos com remoinhos e escoamentos com forte separação do escoamento.

- A teoria RNG fornece uma fórmula analítica para números de Prandtl turbulentos, enquanto o modelo $k-\varepsilon$ standard usa valores constantes especificados pelo utilizador.
- Enquanto o modelo $k-\varepsilon$ standard é um modelo para elevados números de Reynolds, o modelo RNG fornece uma fórmula diferencial analiticamente derivada da viscosidade efectiva que considera os efeitos para os baixos números de Reynolds. O uso eficaz deste recurso, depende de um tratamento adequado na região perto da parede (Fluent 6.3, 2006).

Estas características tornam o modelo $k-\varepsilon$ RNG mais preciso e confiável para uma gama mais ampla de escoamentos do que o modelo $k-\varepsilon$ standard. No entanto este modelo não é adequado para jactos circulares, e não é tão estável quanto o modelo $k-\varepsilon$ standard.

As equações de transporte para k e ε no modelo RNG têm uma forma semelhante ao modelo standard como se pode ver nas equações 2.7a e 2.7b:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.7a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.7b)$$

Onde as constantes $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ têm valores analiticamente derivados pela teoria RNG. Estes valores, são usados por omissão pelo *FLUENT*, são eles:

$$C_{1\varepsilon} = 1,42, C_{2\varepsilon} = 1,68 \quad (2.8)$$

2.4.3. Modelo $k-\varepsilon$ Realizable

O modelo $k-\varepsilon$ Realizable é um modelo desenvolvido recentemente e representa outra versão modificada do modelo $k-\varepsilon$ Standard (Bakker e Marshall, 2004). As principais diferenças entre os modelos são as seguintes: o método de calcular a viscosidade turbulenta; o número de Prandtl turbulento que governa a difusão turbulenta de k e ε ; os termos de geração e dissipação na equação de ε .

O termo "realizable" significa que o modelo satisfaz certos constrangimentos matemáticos nas tensões de Reynolds, consistentes com a física dos escoamentos turbulentos. Um dos maiores benefícios deste modelo é uma maior precisão da taxa de propagação de escoamentos com jactos planos e circulares. Também é provável que forneça um maior desempenho para escoamentos com rotação, camadas limite sob fortes gradientes de pressão, escoamentos com forte separação e recirculação. Segundo alguns estudos, o modelo Realizable, de todos os modelos $k-\varepsilon$, é o que fornece um melhor desempenho para

algumas validações de separação do escoamento e escoamentos com características secundárias mais complexas.

As equações de transporte para k e ε no modelo Realizable são apresentadas nas seguintes equações (2.9a-2.9b):

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + S_\varepsilon \quad (2.9b)$$

onde

$$C_1 = \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (2.10)$$

Constantes do modelo

$$C_2 = 1,9, \quad \sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,2 \quad (2.11)$$

2.4.4. Modelo $k-\omega$ Standard

O modelo $k-\omega$ Standard utilizado pelo *Fluent* é baseado no modelo $k-\omega$ de Wilcox (1998), modelo que incorpora modificações para baixos números de Reynolds, compressibilidade e “shear flow spreading”.

Este modelo foi sendo desenvolvido ao longo dos anos e aperfeiçoado, o termo da produção foi acrescentado às equações de k e ω , que melhoraram a precisão do modelo. A energia cinética turbulenta (k) e a taxa específica de dissipação (ω), podem ser obtidas pelas seguintes equações de transporte (2.12a-2.12b):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (2.12a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2.12b)$$

2.4.5. Modelo $k-\omega$ SST

O modelo $k-\omega$ SST (Shear-Stress Transport) é uma variante do modelo $k-\omega$ standard desenvolvida por Menter (2003). Combina o modelo $k-\omega$ de Wilcox (1998), para usar nas zonas junto de paredes e o modelo $k-\varepsilon$ standard em zonas afastadas de paredes, usando uma função de mistura para garantir que as equações do modelo se comportam adequadamente, modificando a equação da viscosidade turbulenta de forma a contabilizar os efeitos de transporte do princípio turbulento das tensões de corte, outra modificação feita neste modelo foi a adição de um termo de difusão cruzada na equação de ω .

As equações do modelo $k-\omega$ SST têm uma forma semelhante ao modelo $k-\omega$ standard:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2.13a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.13b)$$

Uma maior descrição e desenvolvimento das variáveis que constituem os modelos de turbulência acima mencionados, podem ser consultadas no anexo A

Capítulo 3

Discretização do domínio

3.1. Construção da malha

A construção da malha é vista como um processo crítico e demorado que consome a maior parte do tempo da modelação numérica. Os resultados numéricos devem ser independentes da malha, ou seja a precisão dos resultados depende da qualidade da malha.

Na presente dissertação a construção da malha foi feita com recurso ao software *GAMBIT* (versão 2.2.30). Este programa dispõe de dois métodos de estruturação da malha, estruturada e não-estruturada.

O método da malha estruturada, também chamado de “Mapped Mesh” (Gambit 2.2, 2004), consiste em dispor a malha num padrão regular, podendo este ser repetido em células iguais ou estar disposto com rácios de crescimento. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros em 2D e elementos hexaedros em 3D. A utilização deste tipo de malha possibilita um bom controlo na sua construção, bem como uma maior precisão dos resultados numéricos.

O método da malha não-estruturada utiliza uma forma arbitrária de elementos para preencher o domínio de cálculo e a ordem dos elementos não tem nenhum padrão fixo. Este tipo de malhas utiliza triângulos e quadriláteros em 2D e tetraedros, hexaedros e prismas em 3D. O uso desta malha permite a construção de malhas em torno de geometrias complexas.

Para este trabalho foi utilizada a malha não-estruturada, visto que se adapta melhor ao domínio e obtém melhores resultados numéricos.

Após a construção da malha, o *GAMBIT* permite indicar as condições de fronteira (condições de entrada, de saída, de pressão, de parede, entre outras).

A construção da malha e a validação do modelo numérico é feita de forma sequencial e em fases de complexidade crescente:

- Construção de malhas em 2D: são feitas de forma a determinar a discretização temporal e espacial de modo a reduzir o tempo de cálculo, mas garantindo precisão dos resultados.
- Construção de malhas em 3D: após a construção das malhas em 2D, são aplicadas as conclusões obtidas de forma a não ter um número exagerado de elementos reduzindo o tempo de cálculo e mantendo a precisão dos resultados.

3.2. Malhas 3D

As malhas em 3D descrevem com maior realismo o problema pois este é tridimensional. Após a construção e a simulação com as malhas bidimensionais foram obtidas algumas conclusões acerca dos esquemas numéricos e discretização da malha, a principal finalidade do estudo bidimensional consiste na análise da sensibilidade do modelo numérico, para quando se passa para o modelo tridimensional se ter ideia das alterações necessárias para que o modelo não tenha um número de elementos demasiado elevado, poupando assim no número de elementos e no tempo de cálculo. Houve a necessidade de discretizar bem a zona exactamente a seguir à chaminé devido à quantidade de vórtices que ali se desenvolvem.

A geometria tridimensional simulada neste estudo (figura 3.1), é constituída por um paralelepípedo disposto longitudinal com 8,8854 m de comprimento (onde a montante da chaminé tem uma distância de $10L$ e a jusante uma distância aproximada de $15L$) e uma área de secção de 1×1 m, que representa o túnel de vento (onde a entrada está localizada do lado esquerdo e a saída do lado oposto), e um cilindro posicionado verticalmente com 0,354 m de altura (L) e 0,0354 m de diâmetro (D) que representa a chaminé (onde a entrada da chaminé é na parte inferior e a saída corresponde ao topo da mesma). Tudo o resto à volta que não seja nem entrada nem saída da chaminé ou do túnel de vento é representado como parede, correspondente a velocidades tangenciais e normais nulas.

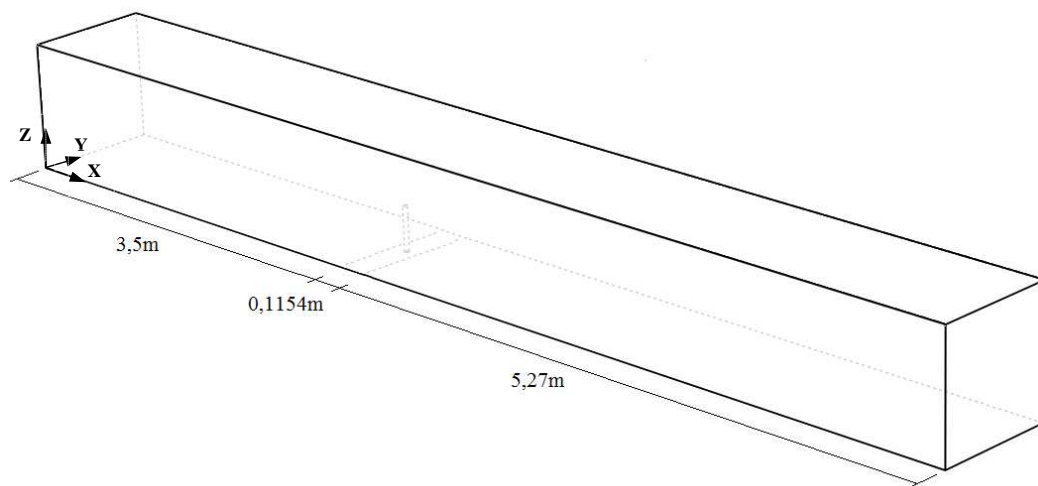


Figura 3.1 – Dimensões do domínio de cálculo tridimensional

Utilizando o domínio apresentado em cima foram construídas 6 malhas, para testar a independência da malha, sendo que a mais grosseira tem 156264 elementos e a mais refinada tem 1187840 elementos. Na tabela 3.1 são apresentados o número total de elementos, o número de elementos no tecto do túnel de vento e o número de elementos na chaminé para as seis malhas tridimensionais.

Malhas 3D	Total de Elementos	Elementos no Tecto	Elementos na Chaminé
Malha 4	156264	2298	4556
Malha 2	331968	3952	7224
Malha 1	685000	6850	10500
Malha 3	996672	8592	14384
Malha 5	1018944	8784	14384
Malha 6	1187840	10240	14848

Tabela 3.1 – Número de elementos das malhas tridimensionais

Nas figuras 3.2 a) a 3.2 f) pode-se observar a discretização no topo da chaminé para as 6 malhas, da mais grosseira à mais refinada.

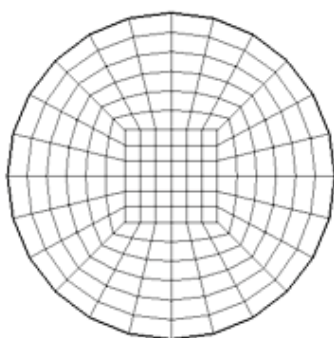


Figura 3.2 a) Malha 4

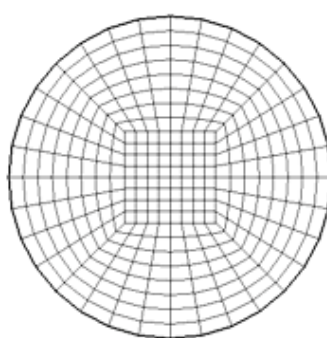


Figura 3.2 b) Malha 2

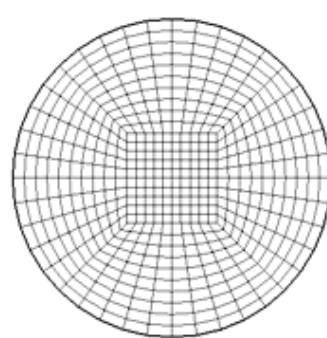


Figura 3.2 c) Malha 1

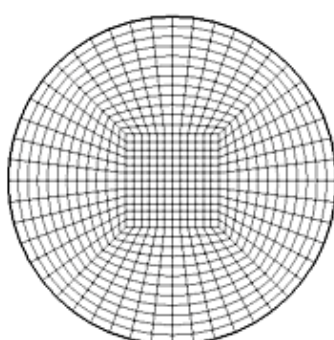


Figura 3.2 d) Malha 3

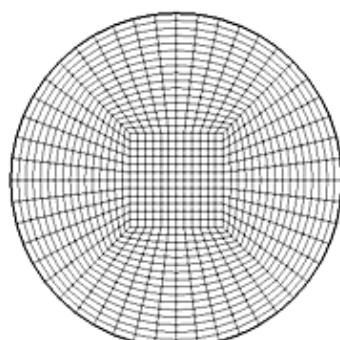


Figura 3.2 e) Malha 5

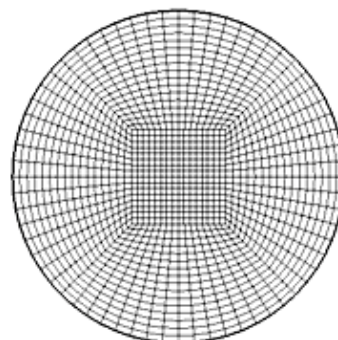


Figura 3.2 f) Malha 6

Figura 3.2 (a – f) – Discretização no topo chaminé

De forma a se poder analisar a qualidade da malha, são apresentadas duas figuras de pormenor referentes à malha 4, que mostram o corte num plano horizontal (figura 3.3) e o corte no plano de simetria (figura 3.4).

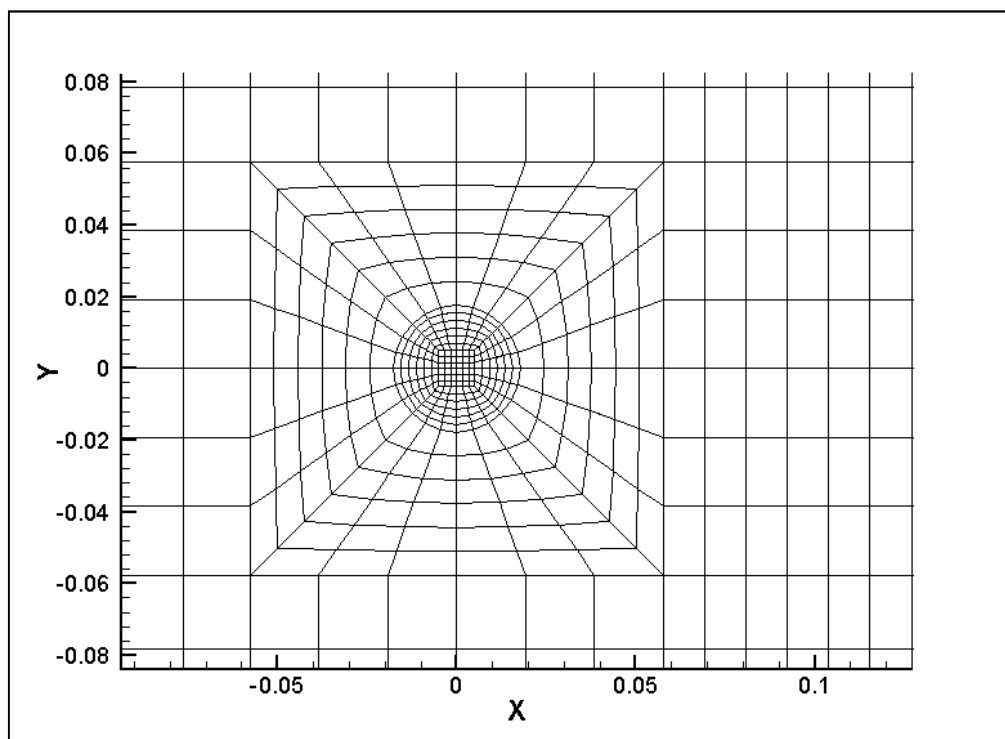


Figura 3.3 - Pormenor da malha 4, corte num plano horizontal

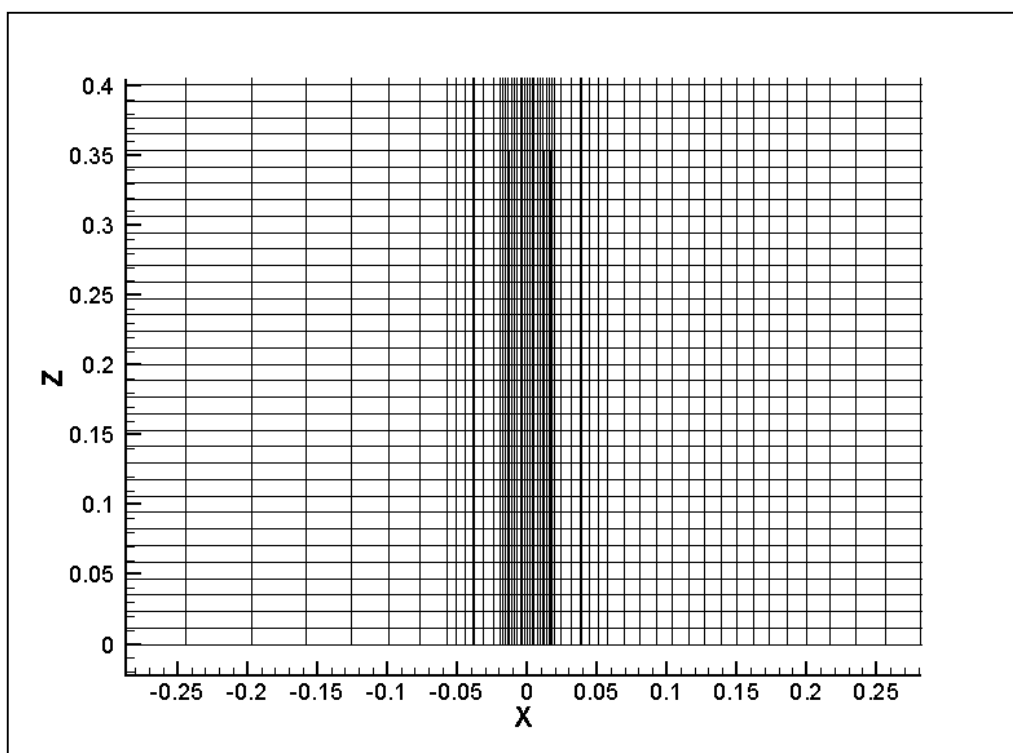


Figura 3.4 – Pormenor da malha 4, corte no plano de simetria

Na figura 3.5 é apresentado um exemplo de discretização para uma das malhas construídas.

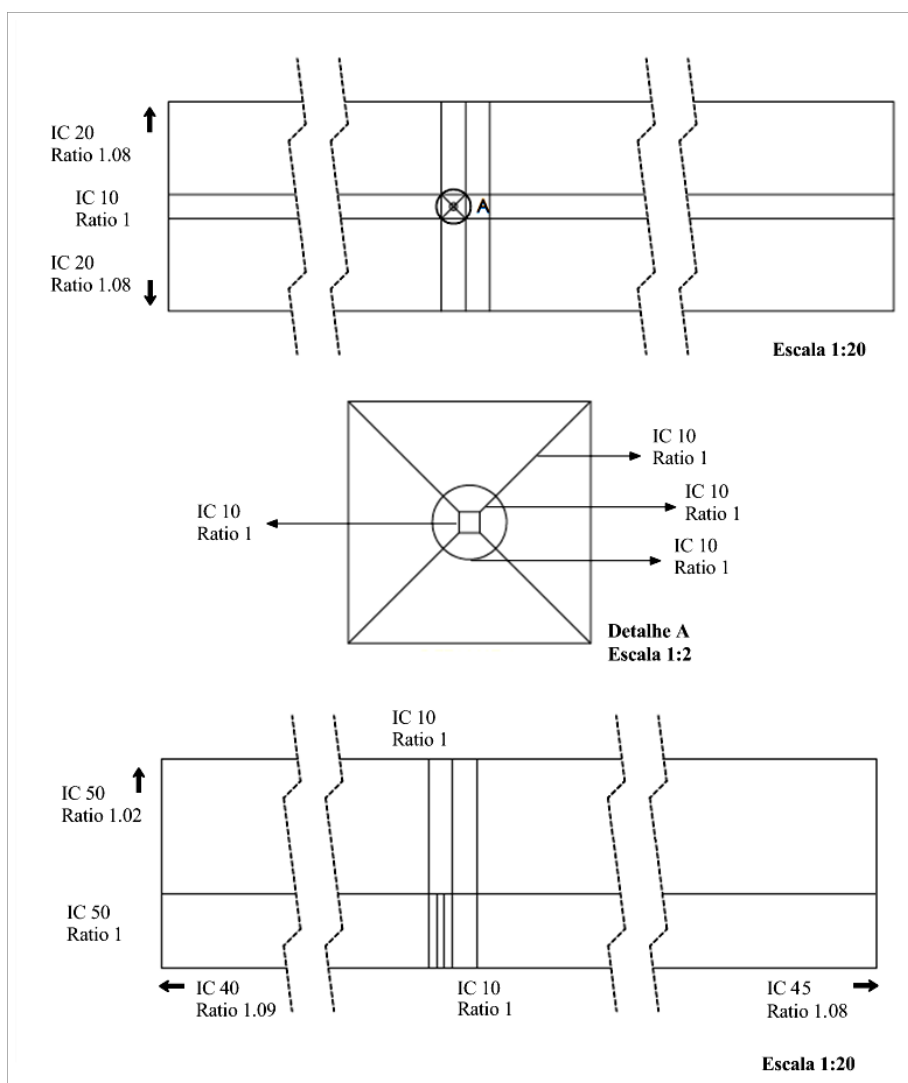


Figura 3.5 – Discretização da malha 1

A discretização mais pormenorizada das malhas pode ser observada no Anexo B.

Após a construção e simulação, foram analisados os resultados das malhas para verificar qual delas se assemelha mais aos resultados experimentais obtidos.

Capítulo 4

Dados experimentais

4.1. Montagem experimental

O ensaio experimental (José Dias *et al.* comunicação privada) foi realizado no túnel aerodinâmico de circuito fechado do LNEC, com uma câmara de ensaios de 1,2x1,0x3,0 m e velocidade variável de 0 a 50 m/s.

O modelo utilizado para simular a chaminé foi construído com um tubo circular de latão de 35,4mm de diâmetro exterior, 31,8mm de diâmetro interior e com uma altura de 354mm. A utilização do manómetro de tubos inclinados de água permitiu medir a variação de pressão nas 6 tomadas de pressão localizadas no interior da chaminé, separadas de 31,8mm entre cada uma delas a partir do topo da chaminé como pode se observar na figura 4.1.

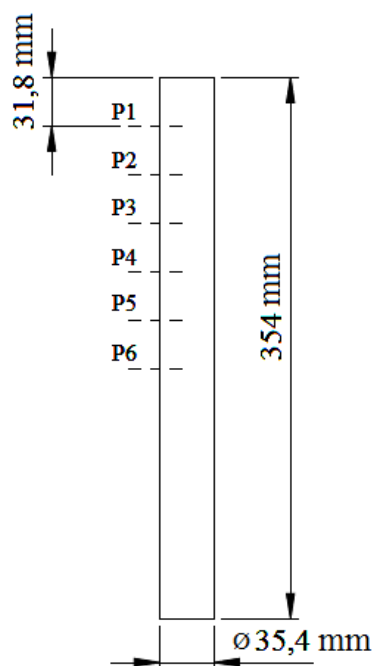


Figura 4.1 - Dimensões da chaminé

Foi utilizado um ventilador na base da chaminé de forma a reproduzir o escoamento no interior desta. As características do ventilador são desconhecidas, pois na altura da experimentação não foram recolhidos esses dados.

De forma a medir a pressão dinâmica do vento (q_v), foi colocado um tubo de Pitot (com 5mm de diâmetro) no interior do túnel de vento alinhado com o escoamento, este por sua vez foi ligado a um micro manómetro de Betz de maneira a medir as diferenças de pressão com maior precisão e estabilidade. Durante a realização do ensaio experimental foram também utilizados 2 micro manómetros de Betz para medir a diferença de pressão no diafragma ($\Delta P_{\text{diafragma}}$) e a pressão relativa ($P_0 - P_1$).

A montagem experimental utilizada para realização deste ensaio experimental, está representada na figura 4.2:

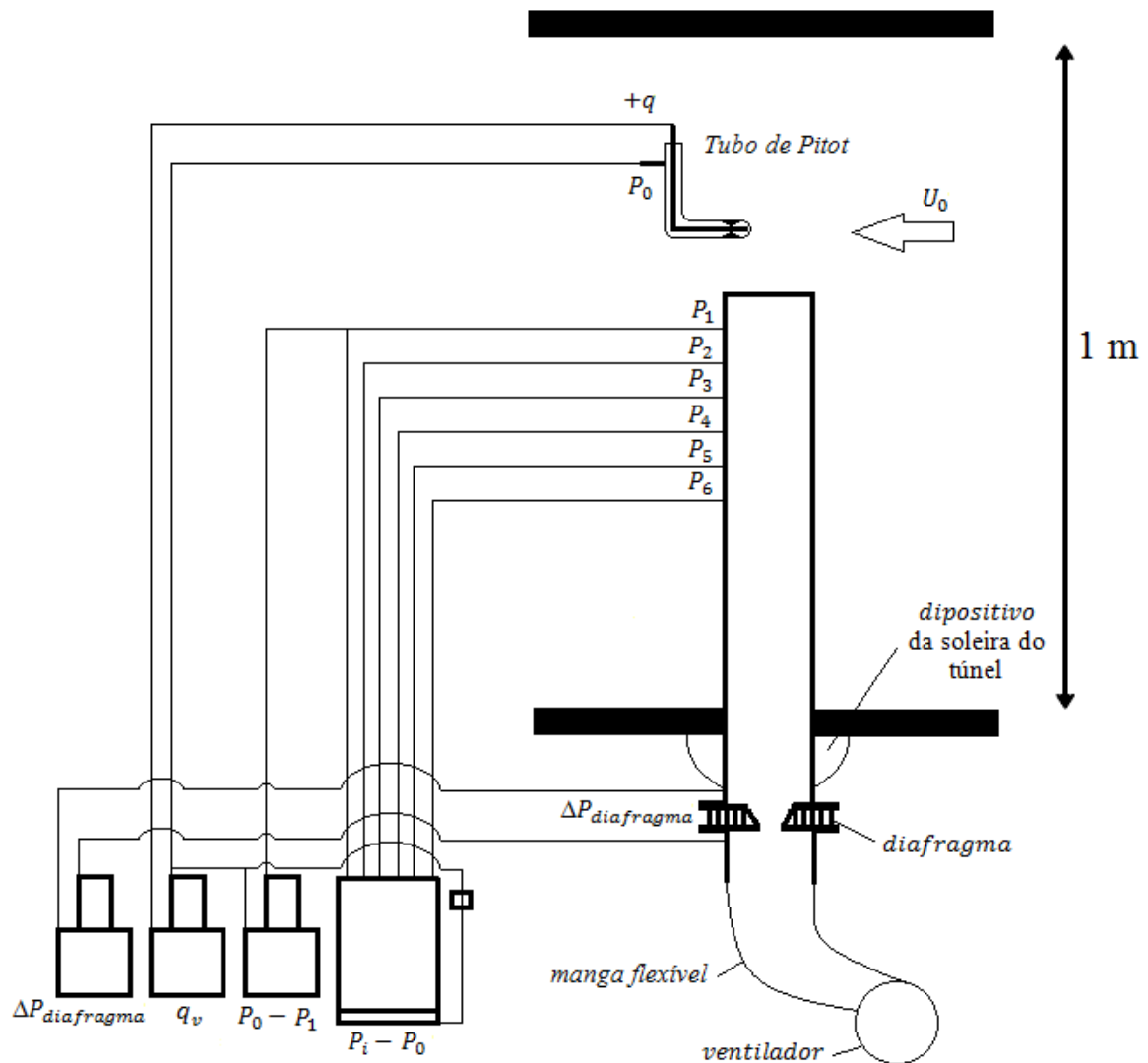


Figura 4.2 - Montagem experimental

4.2. Ensaios

Este ensaio teve como finalidade analisar o comportamento do vento no interior da chaminé. Após alguns ensaios onde foram sendo admitidas várias velocidades na chaminé e no túnel de vento, foram sendo anotados os valores da pressão nas 6 tomadas de pressão, deste modo foi traçada a curva que retrata o comportamento do escoamento no interior da chaminé.

Os ensaios experimentais consistiram na simulação do modelo montado no túnel de vento, atribuindo vários valores de velocidades na entrada do túnel de vento (U_v) e na base da chaminé (U_c), foi também calculado o valor do número de Reynolds correspondente às

velocidades utilizadas no túnel de vento, com base no diâmetro exterior da chaminé (D), estes valores são apresentadas na tabela 4.1:

$$Re = \frac{U_v D}{\nu} \quad (4.1)$$

U_c (m/s)	U_v (m/s)	$\nu \times 10^5$ (m ² /s)	Re	U_c/U_v
0,000	10,420	1,5089	24446	0,000
0,000	20,360	1,5089	47766	0,000
0,000	27,550	1,5089	64634	0,000
0,000	35,750	1,5089	83872	0,000
2,050	35,720	1,5089	83801	0,057
1,600	28,850	1,5089	67684	0,055
1,100	19,720	1,5089	46264	0,056
0,648	12,520	1,5089	29372	0,052
1,608	12,480	1,5089	29279	0,129
2,742	21,210	1,5089	49760	0,129
3,895	30,300	1,5099	71039	0,129
5,246	40,430	1,5137	94553	0,130
8,937	40,280	1,5117	94324	0,222
8,453	29,350	1,5117	68729	0,288
8,264	18,980	1,5137	44388	0,435
8,216	12,740	1,5137	29795	0,645
8,982	12,700	1,5137	29701	0,707

Tabela 4.1 – Valores experimentais da velocidade e do Reynolds

Para as correspondentes velocidades representadas na tabela 4.1 foram tirados os valores da variação da pressão (ΔP) nas 6 tomadas de pressão, localizadas na parede interior da chaminé, no sentido oposto ao da entrada do escoamento no túnel como pode ser visto na figura 4.2. Foi também calculada a pressão dinâmica do vento (q_v) recorrendo à equação 4.2 e o coeficiente de pressão (C_{p6}) na tomada de pressão 6 utilizando a equação 4.3.

$$q_v = \frac{1}{2} \rho U_v^2 \quad (4.2)$$

$$C_{p6} = \frac{\Delta P_6}{q_v} \quad (4.3)$$

ΔP_1 (Pa)	ΔP_2 (Pa)	ΔP_3 (Pa)	ΔP_4 (Pa)	ΔP_5 (Pa)	ΔP_6 (Pa)	q_v (Pa)	C_{p6}
-78,882	-77,450	-74,576	-73,143	-71,711	-74,576	65,531	-1,138
-312,645	-302,639	-292,534	-291,161	-288,316	-289,689	250,351	-1,157
-578,005	-553,578	-536,411	-533,468	-530,623	-533,468	457,342	-1,166
-975,212	-937,934	-906,444	-900,656	-897,811	-900,656	770,085	-1,170
-823,255	-821,784	-820,312	-818,939	-817,467	-818,939	766,652	-1,068
-530,623	-529,250	-528,367	-527,778	-527,189	-527,778	500,016	-1,056
-246,722	-246,722	-245,250	-243,779	-242,405	-243,779	233,674	-1,043
-98,983	-98,983	-98,983	-97,511	-96,138	-98,983	94,176	-1,051
-77,499	-77,499	-76,028	-76,028	-74,556	-76,028	93,686	-0,812
-248,095	-247,506	-246,722	-245,839	-245,250	-248,095	270,560	-0,917
-444,589	-443,118	-442,922	-442,333	-441,744	-444,589	551,322	-0,806
-788,822	-797,161	-787,351	-785,977	-783,034	-780,189	978,548	-0,797
-516,300	-513,455	-510,611	-507,668	-504,823	-507,668	969,719	-0,524
-206,501	-205,127	-203,656	-200,811	-197,966	-200,811	515,025	-0,390
-40,123	-40,123	-37,278	-34,433	-31,588	-32,962	215,820	-0,153
-1,472	0,000	1,472	2,845	5,690	4,316	97,315	0,044
2,845	4,316	5,788	7,161	10,006	8,633	96,923	0,089

Tabela 4.2 – Valores experimentais da pressão

Com base nos valores de C_{p6} e U_c/U_v foi elaborado um gráfico que representa a curva de funcionamento experimental, foram também utilizados outros valores de C_{p6} e U_c/U_v que não chegaram a ser registados em tabelas durante o trabalho experimental, foram apenas registados os valores adimensionais na figura 4.3.

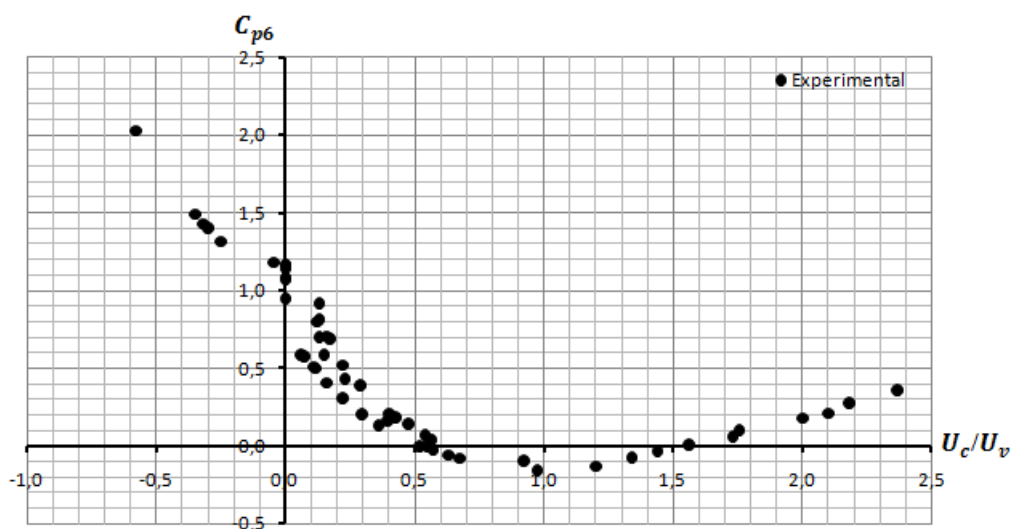


Figura 4.3 – Representação da curva de funcionamento experimental para C_{p6}

Capítulo 5

Dados numéricos das simulações

5.1. Esquema numérico

5.1.1. Modelos numéricos

Com a finalidade de testar a coerência de cada modelo numérico existente nas opções do *FLUENT*, face aos resultados do trabalho experimental, foram feitas várias simulações para cada modelo. São eles os modelos k- ϵ Standard, k- ϵ RNG, k- ϵ Realizable, k- ω Standard e k- ω SST.

5.1.2. Acoplamento pressão-velocidade

O *FLUENT*, permite escolher o algoritmo para o acoplamento entre a pressão e a velocidade. Existem quatro tipos de algoritmos segregados: *SIMPLE*, *SIMPLEC*, *PISO* e *NITA* (Non Iterative Time Advancement). Para cálculos de escoamentos em regime estacionário, geralmente é usado o *SIMPLE* ou o *SIMPLEC*, o *PISO* é recomendado para cálculos de regimes transitórios. O *PISO* também pode ser útil para o cálculo em estado estacionário e transitório para malhas altamente distorcidas (Fluent 6.3, 2006).

O algoritmo de acoplamento utilizado neste estudo é o *SIMPLEC* (*SIMPLE* Consistent). Este algoritmo, baseia-se numa relação que permite corrigir a pressão a cada nova iteração da velocidade. O algoritmo *SIMPLE* tem uma estrutura semelhante (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation), diferindo apenas na expressão da correcção da pressão.

A descrição mais pormenorizada dos algoritmos de acoplamento pressão-velocidade pode ser encontrada no manual do *FLUENT* (Fluent 6.3, 2006).

5.1.3. Discretização

O *FLUENT* permite escolher entre várias variantes dos esquemas de discretização para os termos de convecção, de cada equação que governa os modelos de turbulência. Os esquemas de discretização são: o *First-Order Upwind*, *Second-Order Upwind*, *Power Law*, *QUICK* e o *Third-Order MUSCL* (Fluent 6.3, 2006). O esquema de discretização utilizado para a pressão permaneceu standard, enquanto que para os restantes parâmetros (quantidade de movimento, energia cinética turbulência [k], taxa de dissipação da turbulência [ϵ], taxa específica de dissipação [ω]) foi utilizado o esquema *QUICK*.

O *QUICK* (Quadratic Upstream Interpolation for the Convection Kinematics) é um esquema de discretização que fornece maior precisão para escoamentos com rotação ou com remoinhos. Este esquema é utilizado para malhas quadriláteras ou hexaédricas (Fluent 6.3, 2006). Baseia-se na média ponderada das interpolações através das diferenças centrais e do *Second-Order Upwind*, isto é, utiliza uma interpolação polinomial em três nós consecutivos da malha computacional, constituídos pelos dois nós adjacentes à face e o nó

a montante. Para a face e do volume de controlo unidimensional apresentado na figura 5.1, considerando que a direcção do escoamento é da esquerda para a direita, o valor da variável convectada será obtida pela equação 5.1.

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right] \quad (5.1)$$

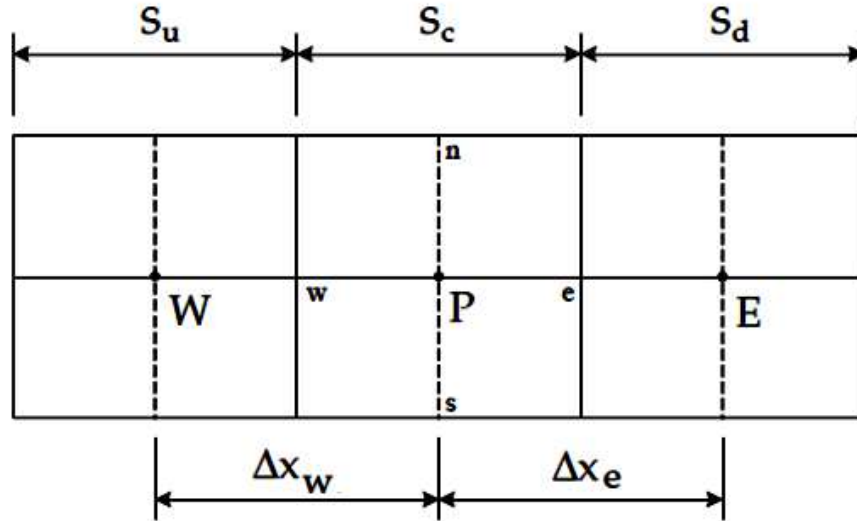


Figura 5.1 – Volume de controlo unidimensional (adaptado de Pitarma, 2003)

Na equação 5.1, caso θ tome valor unitário resulta numa interpolação central de 2ª ordem, caso tome valor nulo leva ao esquema de diferenças a montante de 2ª ordem. O esquema de discretização *QUICK* tradicional é obtido considerando $\theta = 1/8$. Tipicamente, este esquema é mais preciso que os restantes utilizados em malhas estruturadas alinhadas com a direcção do escoamento, possuindo um erro de truncatura de 3ª ordem e sendo os erros de falsa difusão reduzidos significativamente. No entanto, dependendo do modo como é formulado, poderá conduzir a coeficientes da matriz de discretização negativos e a problemas de convergência (Pitarma, 2003).

5.2. Condições de funcionamento

Foi importante definir o valor da pressão atmosférica ($P_{atm} = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) nas condições de funcionamento, assim como a sua localização, centrada na entrada do túnel de vento, para que não houvesse erros nas simulações.

5.3. Condições de fronteira

As condições de fronteira foram seleccionadas no software *GAMBIT* que apesar de ter servido para a construção da malha também possibilitou a escolha da localização das condições de fronteira. Existem duas formas de criar escoamentos em problemas de *CFD*, atribuindo condições de fronteira de velocidade ou de pressão, na presente dissertação optou-se por utilizar ambas as formas, estas podem ser vistas nas tabelas 5.1a e 5.1b:

Localização	Condição de Fronteira
Entrada do túnel de vento (lado esquerdo)	Velocity inlet
Saída do túnel de vento (lado direito)	Outflow
Entrada da chaminé (base)	Velocity inlet
Parede direita	Wall
Parede esquerda	Wall
Tecto	Wall
Chão	Wall
Parede em torno da chaminé	Wall

Tabela 5.1a – Condições de fronteira

Localização	Condição de Fronteira
Entrada do túnel de vento (lado esquerdo)	Velocity inlet
Saída do túnel de vento (lado direito)	Pressure outlet
Entrada da chaminé (base)	Pressure inlet
Parede direita	Wall
Parede esquerda	Wall
Tecto	Wall
Chão	Wall
Parede em torno da chaminé	Wall

Tabela 5.1b – Condições de fronteira

Estas condições de fronteira são usadas no estudo tridimensional. A descrição numérica destas condições de fronteira pode ser encontrada no *Fluent 6.3 User's Guide*, 2006.

5.4. Dados de velocidade e pressão

Nos menus do *FLUENT* é possível definir os valores iniciais a utilizar para cada condição de fronteira (velocidade, pressão, turbulência, etc.).

Como foi mencionado no subcapítulo das condições de fronteira, optou-se por duas formas de criar o escoamento, atribuindo condição de fronteira de velocidade e condições de fronteira de pressão, correspondente aos casos de velocidade e aos casos de pressão respectivamente, onde são definidos valores iniciais para a velocidade e pressão.

Casos	U_c (m/s)	U_v (m/s)	U_c/U_v
Caso Velocidade 11	0,000	10,42	0,0000
Caso Velocidade 12	1,100	19,72	0,0558
Caso Velocidade 13	2,742	21,21	0,1293
Caso Velocidade 14	8,453	29,35	0,2880
Caso Velocidade 15	8,264	18,98	0,4354
Caso Velocidade 16	8,216	12,74	0,6449
Caso Velocidade 17	8,982	12,70	0,7072
Caso Velocidade 18	9,000	17,30	0,5202
Caso Velocidade 19	12,00	12,00	1,0000
Caso Velocidade 20	13,40	8,92	1,5022
Caso Velocidade 21	20,70	10,35	2,0000
Caso Velocidade 22	25,00	10,63	2,3518
Caso Velocidade 23	-2,96	7,97	-0,3714
Caso Velocidade 24	-4,17	6,82	-0,6114

Tabela 5.2 – Dados das velocidades impostas na entrada da chaminé e do túnel de vento

Casos	Pressão de entrada na chaminé	U_c (m/s)	U_v (m/s)	U_c/U_v
Caso Pressão 1	-74,563	-1,52	10,42	-0,1459
Caso Pressão 2	-243,764	-1,668	19,72	-0,0846
Caso Pressão 3	-248,094	-0,30	21,21	-0,0142
Caso Pressão 4	-211,190	4,12	29,35	0,1404
Caso Pressão 5	-44,385	4,32	18,98	0,2277
Caso Pressão 6	-5,439	3,99	12,74	0,3135
Caso Pressão 7	-2,436	4,25	12,70	0,3346

Tabela 5.3 – Dados da pressão imposta na entrada da chaminé e da velocidade na entrada do túnel de vento

Ao introduzir os valores iniciais para velocidade e pressão nas condições de fronteira no *FLUENT*, para ambas as entradas, tanto na chaminé como na entrada do túnel de vento, foram também definidos os valores iniciais da turbulência para ambos os modelos k - ε e k - ω .

Os valores iniciais para os modelos de turbulência são apresentados na tabela seguinte:

	Valor inicial
k	$1 \times 10^{-5} (m^2/s^2)$
ε	$1 \times 10^{-5} (m^2/s^3)$
ω	$0,082479 (s^{-1})$

Tabela 5.4 – Condições iniciais da turbulência

Para calcular o valor inicial de ω foi utilizado o seguinte procedimento (Fluent 6.3, 2006):

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} l} \quad (5.2)$$

Onde,

$$C_\mu = 0,09; \quad l = 0,07L_1 \quad (5.3)$$

L_1 em canais de secção não circular corresponde ao diâmetro hidráulico, nesta caso como se trata de um túnel de secção quadrada de 1m, tem-se que $L_1 = 1$ (m).

Sendo assim, temos:

$$\omega = \frac{(1 \times 10^{-5})^{1/2}}{(0,09)^{1/4} \times 0,07 \times 1} = 0,082479 \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (5.4)$$

5.5. Critério de convergência

Considera-se que as simulações numéricas atingem a convergência exigida durante o processo iterativo quando os resíduos estabilizam, atingindo patamares correspondentes aos resíduos mínimos para cada uma das variáveis. Como critério de convergência dos resíduos foi utilizado o valor 1×10^{-6} para todos os resíduos: continuidade, velocidade em X, velocidade em Y, velocidade em Z, Energia Cinética Turbulenta (k), Taxa de Dissipação da Turbulência (ε) e Taxa Específica de Dissipação (ω).

Capítulo 6

Resultados numéricos

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados adquiridos por simulação numérica no *FLUENT* (versão 6.3.26), obtidos de acordo com os procedimentos anteriormente expostos, com os quais se faz a devida comparação. Sempre que possível os resultados numéricos são comparados com os dados resultantes do trabalho experimental.

6.1. Comparação dos resultados experimental vs. computacional

Inicialmente foram utilizadas as malhas tridimensionais de 1 a 4 para simular os casos onde são admitidas velocidade ou pressão, e assim poder testar os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ (Standard, RNG e Realizable) e $k-\omega$ (Standard e SST), com a finalidade de identificar que malha e que modelo de turbulência se adapta melhor aos resultados obtidos experimentalmente. Apenas a malha 1 foi sujeita a simulações com todos os modelos de turbulência atrás mencionados, após a análise das simulações de todos os modelos foram escolhidos apenas o $k-\varepsilon$ Standard e o $k-\omega$ SST para as simulações nas restantes malhas. Concluiu-se que a malha 3 é aquela que obtém resultados mais aproximados.

O modelo $k-\varepsilon$ Standard apresenta uma maior proximidade dos resultados experimentais no lado negativo do eixo U_c/U_v (figura 6.1), correspondente às situações em que o ar está a ser sugado para o interior da chaminé. Do ponto de vista da ventilação natural este efeito de sucção não tem grande interesse de estudo para este trabalho, dado que o ar interior não é extraído, não cumprindo assim o efeito pretendido de uma chaminé.

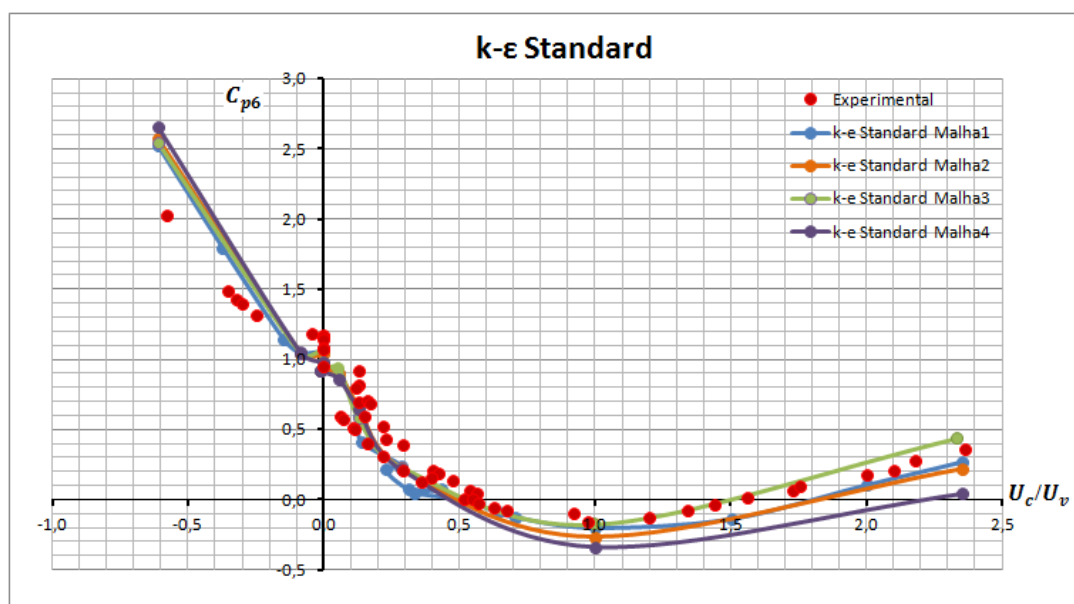


Figura 6.1 – Comparação entre as 4 malhas ($k-\varepsilon$ Standard)

Por outro lado o modelo $k-\omega$ SST é o que mais se aproxima dos resultados experimentais no lado positivo do eixo U_c/U_v , como se pode observar na figura 6.2, correspondente aos casos em que o ar é extraído da chaminé. Este modelo é o que tem mais importância para

este estudo, pois do ponto de vista da ventilação natural cumpre a principal função de uma chaminé, a extracção de fumos, gases, poluentes, etc.

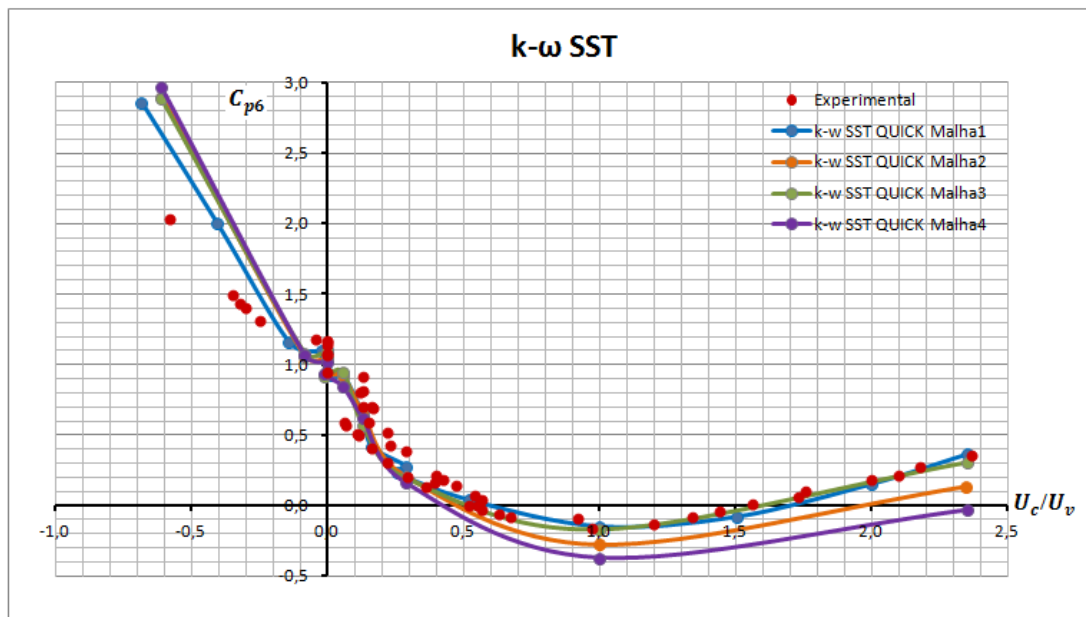


Figura 6.2 – Comparação entre as 4 malhas ($k-\omega$ SST)

Depois de ter sido determinado o modelo de turbulência que mais se aproxima dos resultados experimentais, e após se ter escolhido a malha tridimensional 3 como aquela que obtinha os melhores resultados, sendo esta que até aqui era a malha com maior número de elementos. Para estudar a independência das malhas foram construídas outras duas malhas mais refinadas que as anteriores (malha 5 e 6), e posteriormente foram sujeitas a simulações com o modelo de turbulência escolhido ($k-\omega$ SST) para verificar se os resultados se aproximavam mais dos resultados obtidos experimentalmente.

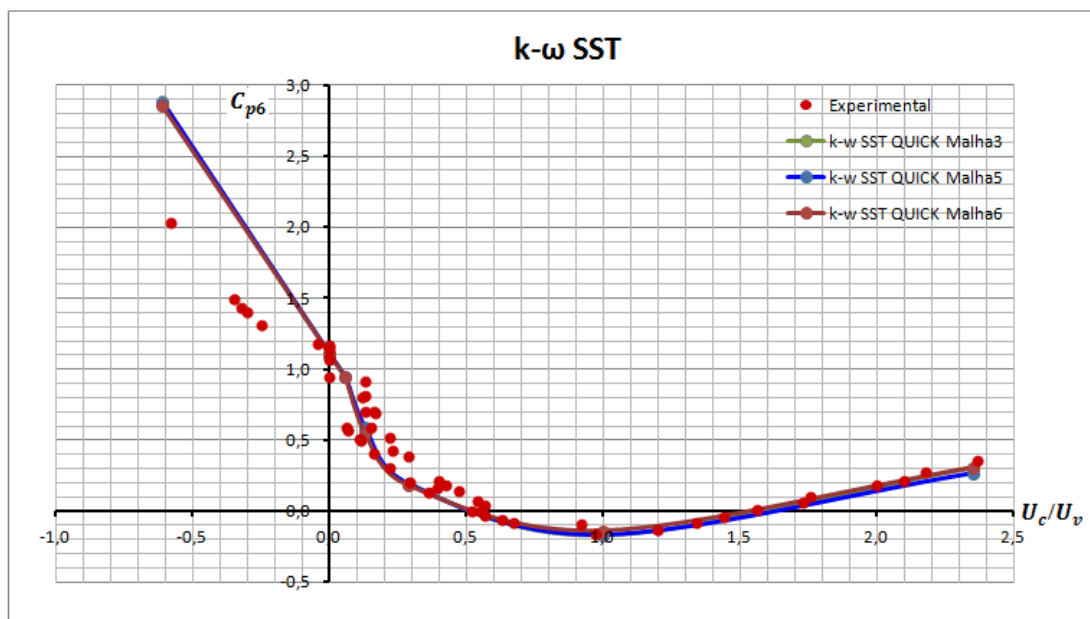


Figura 6.3 – Comparação entre as malhas 3, 5 e 6 ($k-\omega$ SST)

Os resultados destas últimas duas malhas (5 e 6) mostraram ser bastante aproximados da malha 3, sendo assim o estudo manteve-se em torno da análise das simulações da malha 3.

6.2. Análise da evolução do escoamento ao longo eixo U_c/U_v

Para analisar a evolução do escoamento foram analisados alguns casos presentes na figura 4.3 correspondente à curva de funcionamento, onde esta foi dividida em 6 intervalos ($U_c/U_v < 0$; $U_c/U_v = 0$; $0 < U_c/U_v < 0,6$; $0,6 < U_c/U_v < 1,5$; $1,5 < U_c/U_v < 2$; $U_c/U_v > 2$). Entre todos os casos simulados para a malha 3, que foi a malha que teve resultados mais aproximados aos resultados experimentais, foram escolhidos 9 casos presentes nestes intervalos para fazer a descrição do seu comportamento como pode ser observado na figura 6.4.

Para cada caso simulado foi feita uma adimensionalização da magnitude da velocidade em relação à velocidade imposta na entrada do túnel de vento.

Estas análises foram feitas em relação ao plano de simetria Y e aos planos de corte Z.

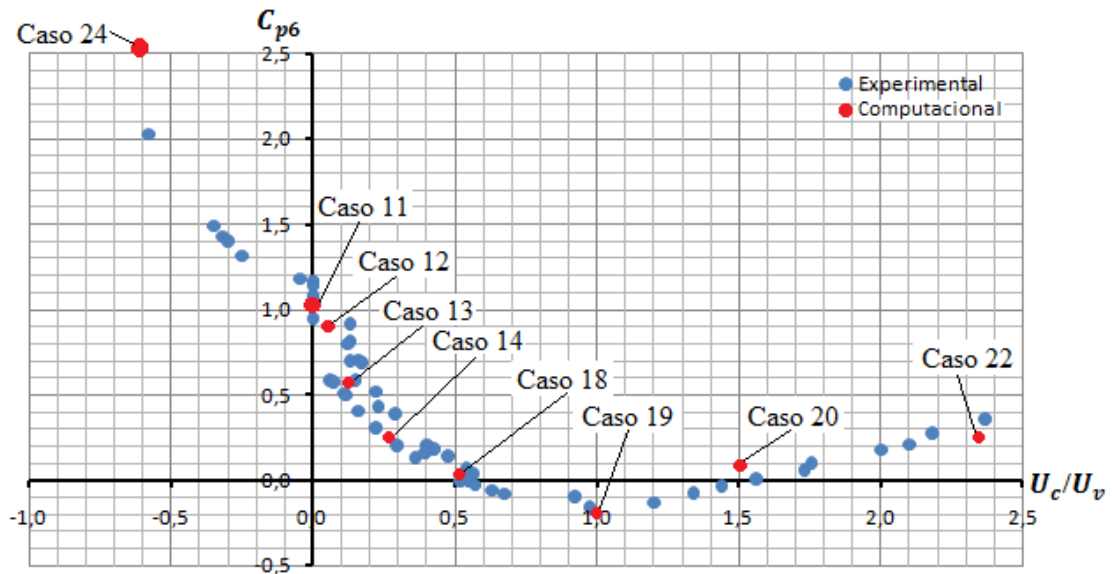


Figura 6.4 - Análise de alguns casos presentes na curva de funcionamento

$U_c/U_v < 0$

Caso 24

Neste caso é imposta uma velocidade de sucção na chaminé. Quando o escoamento proveniente da entrada do túnel de vento atinge o topo da chaminé este é sugado para o interior pelo lado direito da chaminé, criando um vórtice no interior desta do lado esquerdo. Sendo assim nota-se que no interior da chaminé a velocidade do escoamento que entra é superior do lado direito devido aos vórtices que se formam à entrada.

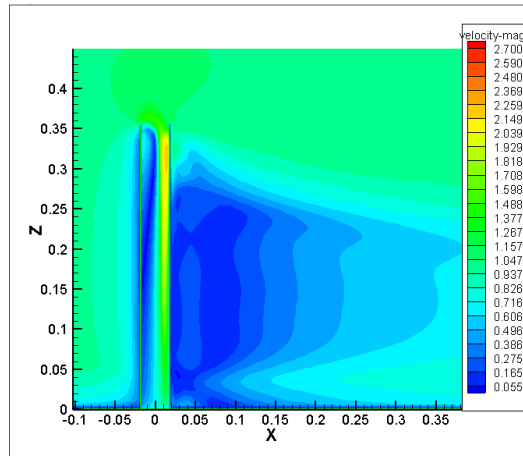


Figura 6.5 - Corte de simetria do caso 24

Nota-se que existe uma simetria em relação ao eixo Y no interior da chaminé ao longo de toda a sua altura. Já a sotavento desta não se passa o mesmo, há uma ligeira assimetria entre $Z=0,2$ m e $Z=0,34$ m onde existem alguns vórtices, mais acima quase no topo no plano $Z=0,35$ m já começa a haver uma simetria simultânea entre o interior e a zona da esteira, como pode ser observado nos planos de corte Z. O ar que é sugado para o interior da chaminé tem uma maior intensidade no lado direito, pois o escoamento é obstruído à entrada pelo rebordo da chaminé, criando depois um efeito de recirculação ao longo de toda a chaminé, do lado esquerdo, fazendo com que o escoamento não seja uniforme no seu interior.

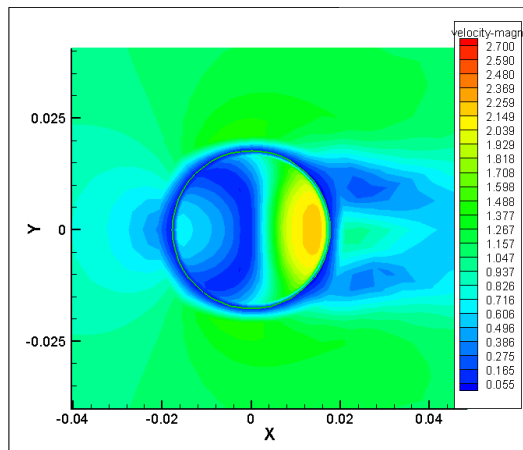


Figura 6.6 - Caso 24, corte em $Z=0,32$ m

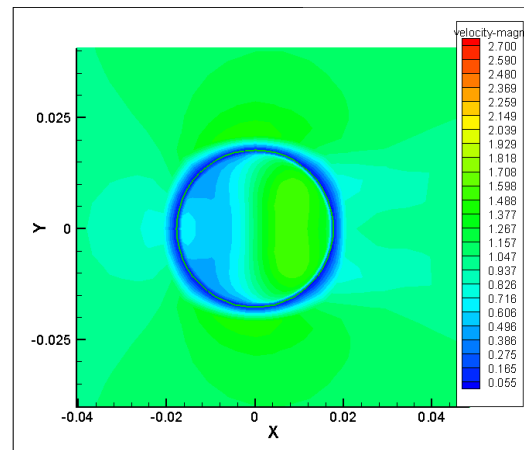


Figura 6.7 - Caso 24, corte em $Z=0,35$ m

$$U_c/U_v = 0$$

Caso 11

A velocidade na chaminé é nula, no entanto devido à velocidade imposta à entrada do túnel de vento, é criado um grande vórtice no topo da chaminé. O escoamento proveniente do vórtice gerado irá dar origem a outros vórtices à medida que este vai descendo pela chaminé. Imediatamente a seguir à chaminé ocorre uma pequena recirculação. No topo da chaminé começa-se a notar a formação de uma pluma.

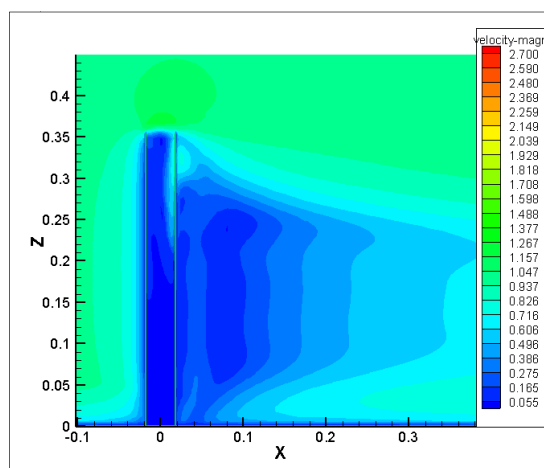


Figura 6.8 - Corte de simetria do caso 11

Traçando planos de corte em Z nota-se que não existe qualquer tipo de simetria nem no interior nem a sotavento.

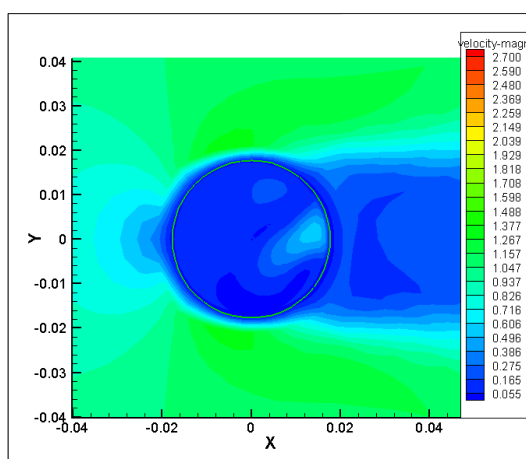


Figura 6.9 - Caso 11, Corte em Z=0,2655m

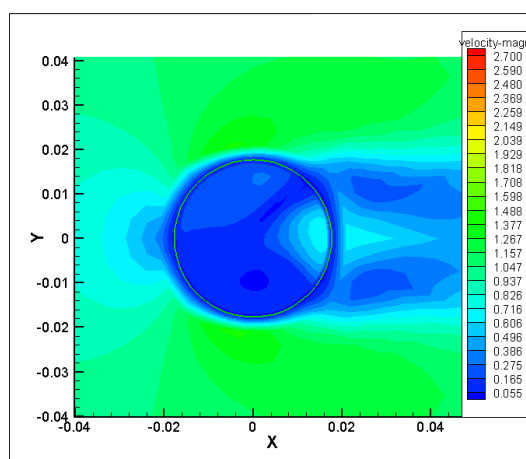


Figura 6.10 - Caso 11, Corte em Z=0,30975m

$$0 < U_c/U_v < 0,6$$

Caso 12, caso 13 e caso 14

Nestes casos já é imposta uma velocidade à entrada da chaminé, o escoamento no interior da chaminé mantém-se praticamente uniforme. No caso 12 o escoamento sobe pelo lado esquerdo da chaminé, chegando ao topo este entra em contacto com o escoamento proveniente da entrada do túnel de vento que vai provocar um vórtice no interior da chaminé, do lado direito próximo da saída da chaminé. Ao contrário do que acontece quando o escoamento está a entrar na chaminé pelo lado direito, juntando-se ao escoamento do túnel este cria um vórtice no interior da chaminé do lado esquerdo. Nos restantes casos o escoamento sobe uniformemente. Após o escoamento passar a chaminé começa a formar-se a uma bolha de recirculação na base da chaminé. Nota se que a pluma no topo da chaminé começa a crescer à medida que a velocidade imposta na chaminé também aumenta e nota-se também uma subida da zona de baixa velocidade.

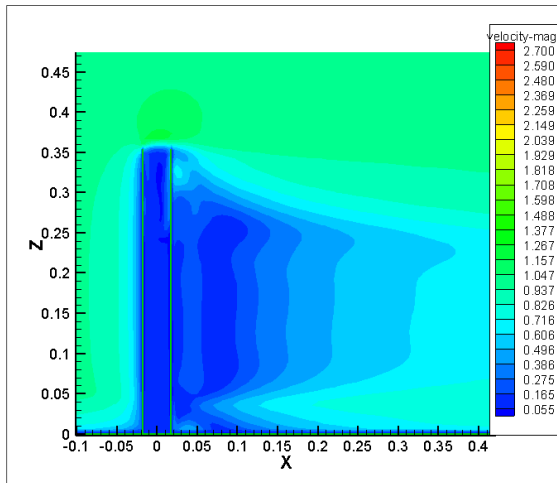


Figura 6.11 - Corte de simetria do caso 12

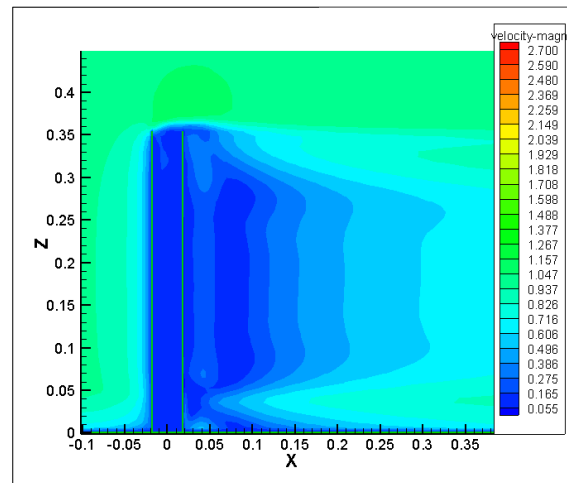


Figura 6.12 - Corte de simetria do caso 13

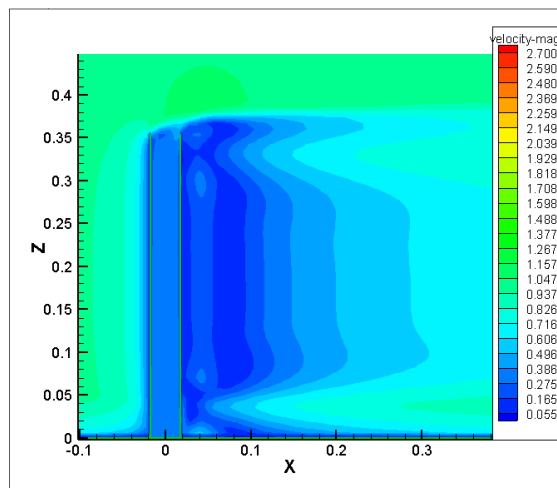


Figura 6.13 - Corte de simetria do caso 14

Caso 18

Com o aumento progressivo da velocidade na chaminé começa-se a observar no topo da chaminé que o escoamento começa a fugir ligeiramente para a direita, provocando a subida da zona de baixa velocidade, um pouco acima da entrada da chaminé, cada vez mais alongada na direcção da saída do túnel. Em relação aos casos 12, 13 e 14 em que a pluma ainda se encontrava horizontal, esta agora começa a ganhar uma inclinação para cima.

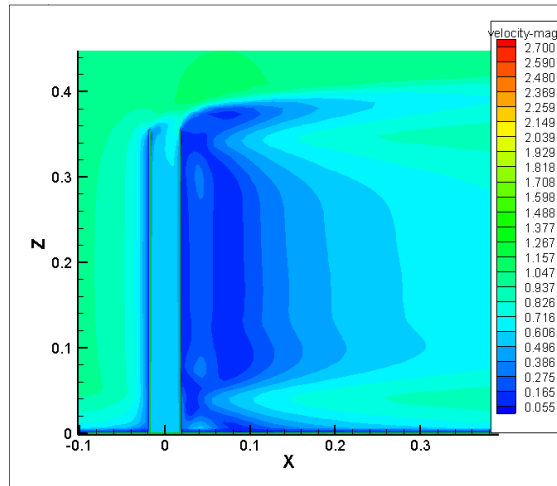


Figura 6.14 - Corte de simetria do caso 18

Através da análise dos planos de corte em Z no caso 12, verifica-se que entre $Z=0$ m e $Z=0,23$ m o escoamento no interior da chaminé mantêm-se constante em relação ao eixo de simetria Y, daí para cima deixa de ter qualquer simetria, pois o escoamento tende a subir pelo lado esquerdo devido aos vórtices que se formam do lado direito provocados pela interação com o escoamento proveniente da entrada do túnel de vento.

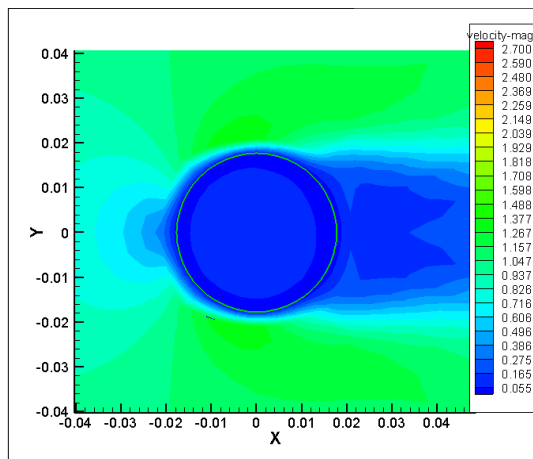


Figura 6.15 - Caso 12, corte em $Z=0,23$ m

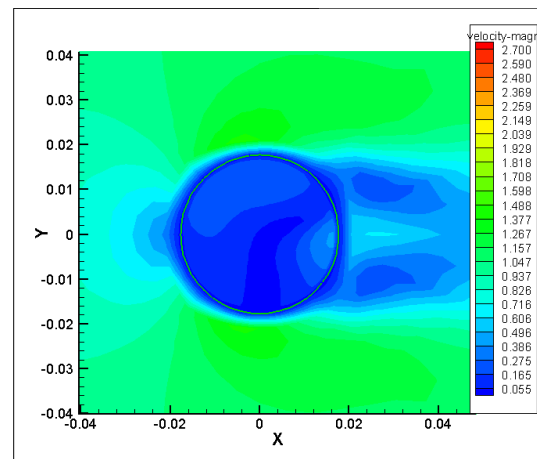


Figura 6.16 - Caso 12, corte em $Z=0,32$ m

No caso 13, verifica-se que quase ao longo de toda a altura da chaminé o escoamento no seu interior e a sotavento se mantém simétrico em relação ao eixo Y até cerca de $Z=0,28$ m, a partir daí o escoamento torna-se assimétrico a sotavento.

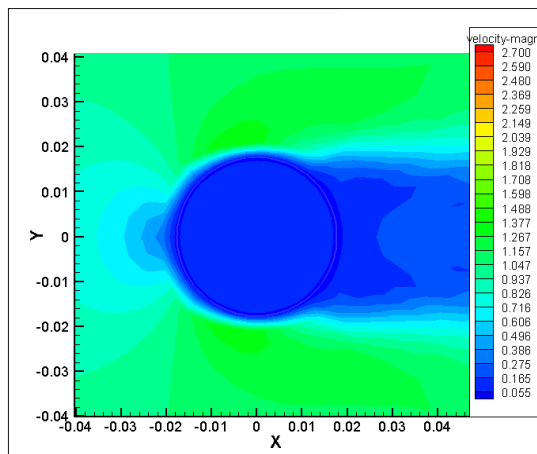


Figura 6.17 - Caso 13, corte em Z=0,28m

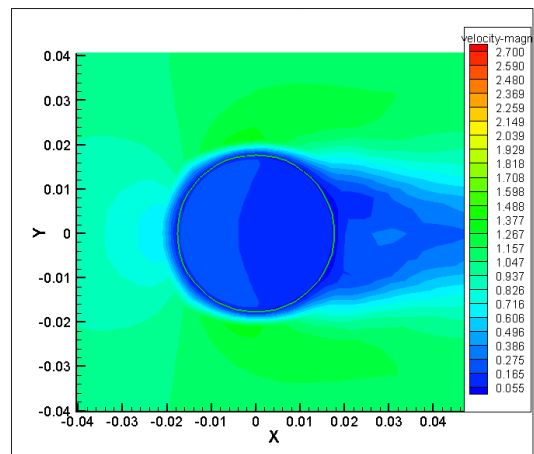


Figura 6.18 - Caso 13, corte em Z=0,35m

A partir de um determinado valor da velocidade admitida na chaminé, o escoamento tende a manter-se simétrico em relação ao eixo Y em todo o interior da chaminé e a sotavento na zona da esteira, como se pode observar nos planos de corte em Z correspondente aos casos 14 e 18. Nestes casos o escoamento à saída tende a ser mais forte junto à parede no lado direito da chaminé ainda no seu interior, a partir de onde se começa a notar a formação da pluma. Para o caso 14 a formação da pluma inicia-se em Z=0,35m e para o caso 18 esta formação dá início em Z=0,32m.

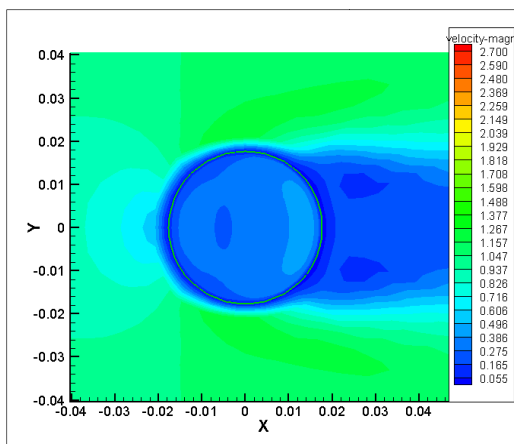


Figura 6.19 - Caso 14, corte em Z=0,35 m

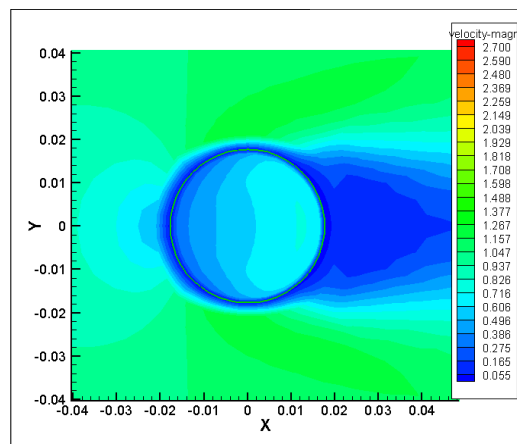


Figura 6.20 - Caso 18, corte em Z=0,32m

$$0,6 < U_c/U_v < 1,5$$

Caso 19

Aplicando uma velocidade na chaminé e no túnel de vento de igual intensidade, observa-se um crescimento da pluma desde a altura em que os escoamentos se encontram na saída da chaminé até à saída do túnel, verifica-se também um grande acentuação na inclinação da mesma. O escoamento no interior da chaminé mantém-se constante ao longo da chaminé. A bolha de recirculação formada a seguir à saída da chaminé vai ficando cada vez mais espalmada, acompanhando o escoamento da pluma.

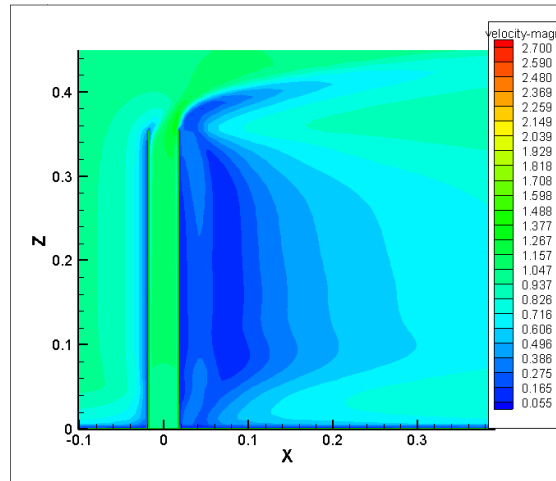


Figura 6.21 - Corte de simetria do caso 19

A velocidade no interior da chaminé mantêm-se sempre constante até chegar quase ao topo onde o escoamento tende a ser mais intenso junto à parede direita, ainda no interior da chaminé, a partir de $Z=0,32$ m começa-se a notar a formação da pluma

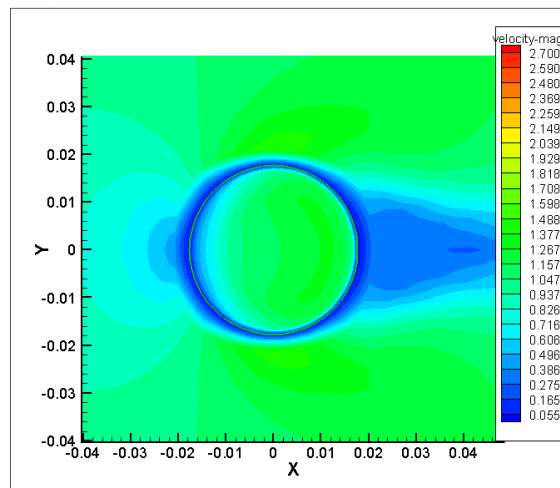


Figura 6.22 - Caso 19, corte em $Z=0,32$ m

$$1,5 < U_c/U_v < 2$$

Caso 20

Já com uma velocidade na chaminé superior à velocidade imposta na entrada do túnel de vento, o escoamento ao sair da chaminé curva logo para a direita formando assim uma pluma acentuada que vai subindo desde a saída da chaminé até à saída do túnel.

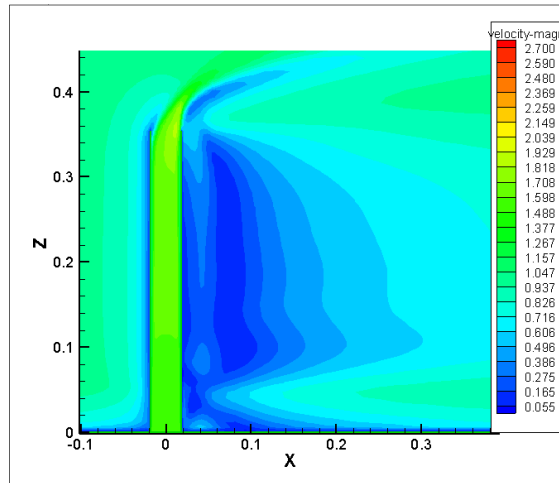


Figura 6.23 - Corte de simetria do caso 20

Tal como no caso 19, o escoamento mantém-se constante até à altura antes de sair da chaminé, onde o escoamento vai ser mais intenso junto à parede no lado direito da chaminé ainda no seu interior. Para o caso 20 a formação da pluma começa a notar-se a partir de $Z=0,31$ m.

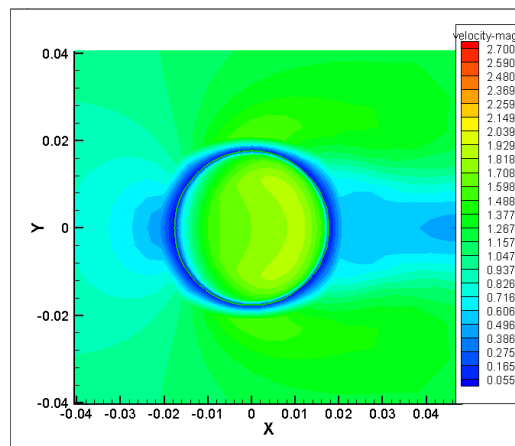


Figura 6.24 – Caso 20, corte em $Z=0,31$ m

$$U_c/U_v > 2$$

Caso 22

A zona de recirculação fora da chaminé está muito mais afastada neste caso, onde a velocidade na chaminé é superior a todos os casos restantes.

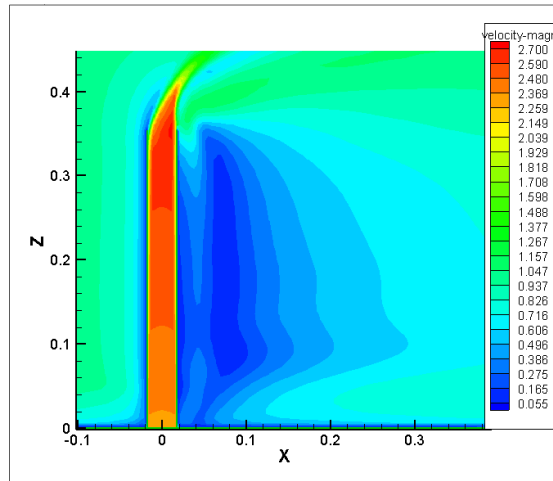


Figura 6.25 - Corte de simetria do caso 22

O escoamento no seu interior mantém se constante até $Z=0,35$ m a partir de onde se começa a formar uma pluma bastante acentuada.

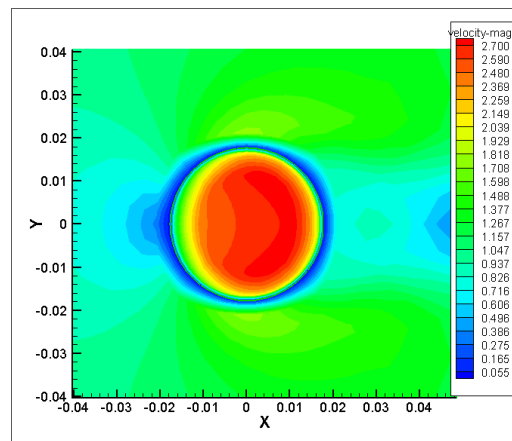


Figura 6.26 - Caso 22, corte em $Z=0,35$ m

Uma evolução mais completa dos planos de corte Z para os casos acima descritos, pode ser observada no Anexo C.

6.3. Coeficiente de pressão vs. altura adimensional da chaminé

Após a recolha e tratamento dos dados das simulações numéricas, houve a preocupação de adimensionalizar a variação de pressão (ΔP) nas tomadas de pressão em função da pressão dinâmica do vento (q_v), de modo a elaborar alguns gráficos correspondentes a casos de estudo experimental. De forma a se poder interpretar a evolução do coeficiente de pressão (C_p) em função da altura da chaminé (L), esta também foi adimensionalizada em função do diâmetro (D), ficando assim com a altura adimensionalizada (L/D) a variar entre 0 e 10, sendo que o referencial foi considerado no topo da chaminé.

Com estas duas variáveis adimensionais foram elaborados 4 gráficos correspondentes aos casos 11, 12, 13 e 14, representando a variação do coeficiente de pressão nas 6 tomadas de pressão em função da altura adimensional da chaminé, para o modelo experimental e para as 6 malhas tridimensionais.

A zona da curva de funcionamento experimental (figura 4.3) onde estão localizados os casos utilizados para esta análise, é um pouco instável, de forma a precisar o grau de erro entre os dados experimentais e numéricos é calculado o erro relativo para cada caso.

Cálculo do erro relativo entre os dados experimentais e numéricos

Erro absoluto - seja X o valor exacto de uma quantidade e x o valor aproximado dessa mesma quantidade. Chama-se erro absoluto Δ ao módulo da diferença entre o valor exacto e o valor aproximado, ou seja:

X - Valor exacto

x - Valor aproximado

$$\Delta = |X - x| \quad (6.1)$$

Erro relativo - chama-se erro relativo de um número aproximado x à razão entre o erro absoluto Δ desse número e o módulo do número exacto correspondente, ou seja:

$$\delta = \frac{|X - x|}{|X|} \quad (6.2)$$

Caso 11

O caso 11 corresponde ao caso onde a velocidade à entrada da chaminé é nula. Na figura 6.27 é possível observar a proximidade das curvas correspondentes às malhas estudadas à curva experimental, sendo a malha 3 a que se encontra mais próxima, isto é, a que apresenta menor erro relativo em função às outras curvas, a variar entre 0,45% e 3,69%. Os erros relativos para as restantes malhas do caso 11 podem ser consultados na tabela 6.1.

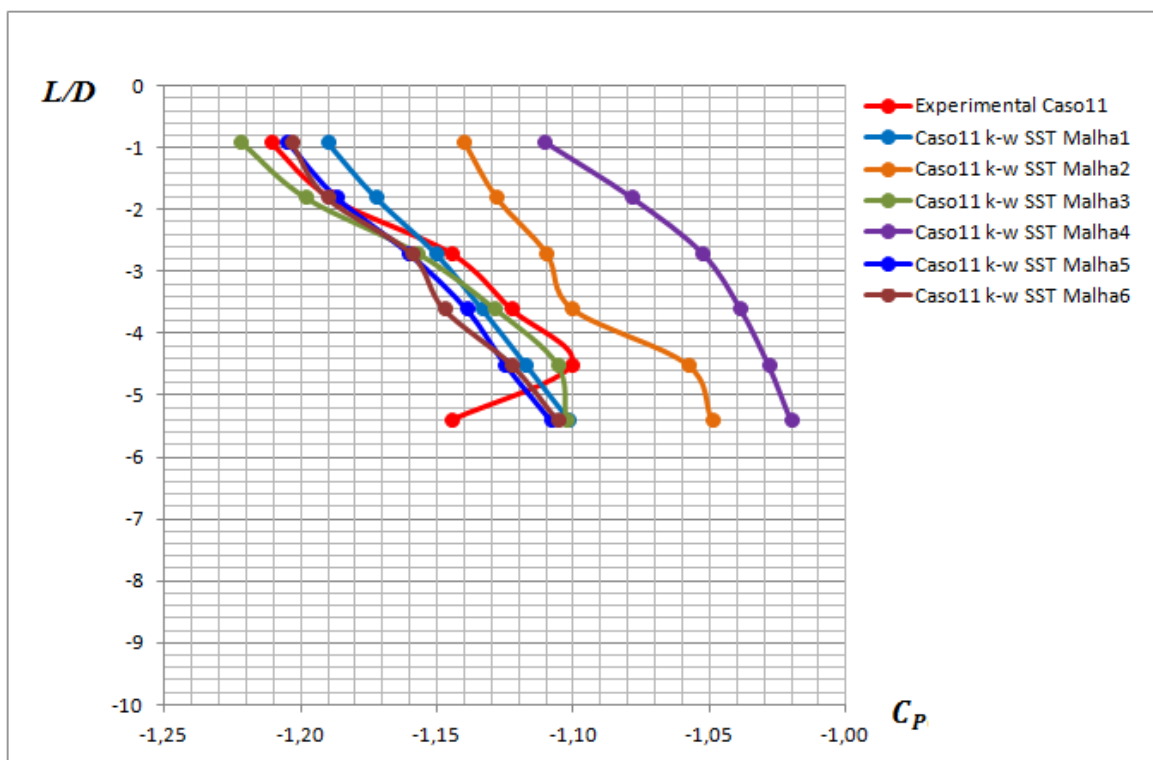


Figura 6.27 – Variação do C_p com a altura adimensional para o caso 11

Tomada de pressão	Malha1	Malha2	Malha3	Malha4	Malha5	Malha6
P1	1,72%	5,85%	0,92%	8,29%	0,47%	0,62%
P2	1,39%	5,11%	0,79%	9,28%	0,16%	0,12%
P3	0,51%	3,05%	1,08%	8,05%	1,38%	1,29%
P4	0,96%	2,00%	0,53%	7,49%	1,48%	2,19%
P5	1,53%	3,88%	0,45%	6,58%	2,20%	1,99%
P6	3,76%	8,35%	3,69%	10,89%	3,18%	3,40%

Tabela 6.1 – Erros relativos do caso 11

Caso 12

No caso 12, já se nota um maior afastamento dos resultados obtidos, através da análise da figura 6.28 é possível observar que a malha 5 se encontra mais próxima da curva experimental seguida da malha 3, com uma diferença mínima de erros relativos entre elas. A malha 5 apresenta um erro relativo que varia entre 5,51% 9,10%, enquanto a malha 3 varia entre 5,60% e 9,12%. Os erros relativos para as restantes malhas do caso 12 podem ser consultados na tabela 6.2.

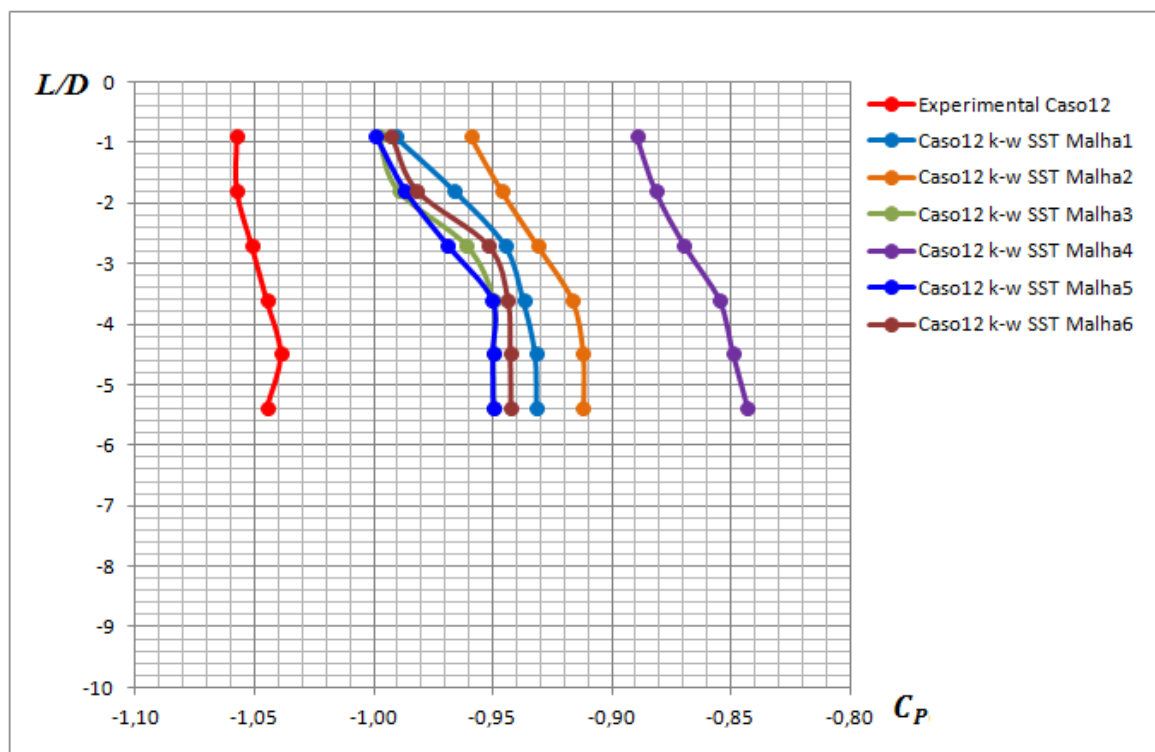


Figura 6.28 – Variação do C_p com a altura adimensional para o caso 12

Tomada de pressão	Malha1	Malha2	Malha3	Malha4	Malha5	Malha6
P1	6,31%	9,29%	5,60%	15,89%	5,51%	6,12%
P2	8,66%	10,51%	6,42%	16,63%	6,67%	7,15%
P3	10,12%	11,40%	8,58%	17,26%	7,82%	9,44%
P4	10,32%	12,25%	9,11%	18,16%	9,06%	9,68%
P5	10,29%	12,20%	8,59%	18,25%	8,57%	9,26%
P6	10,86%	12,71%	9,12%	19,30%	9,10%	9,80%

Tabela 6.2 – Erros relativos do caso 12

Caso 13

Em relação aos casos anteriores, o caso 13 apresenta maiores erros relativos nos resultados obtidos, devido a estar localizado numa zona de maior instabilidade da curva de funcionamento. Na figura 6.29 é possível observar que a malha 2 e 1 se encontram mais próximas da curva experimental. A malha 2 apresenta um erro relativo que varia entre 27,87% e 28,80%, enquanto a malha 1 varia entre 29,27% e 30,18%. Os erros relativos para as restantes malhas do caso 13 podem ser consultados na tabela 6.3.

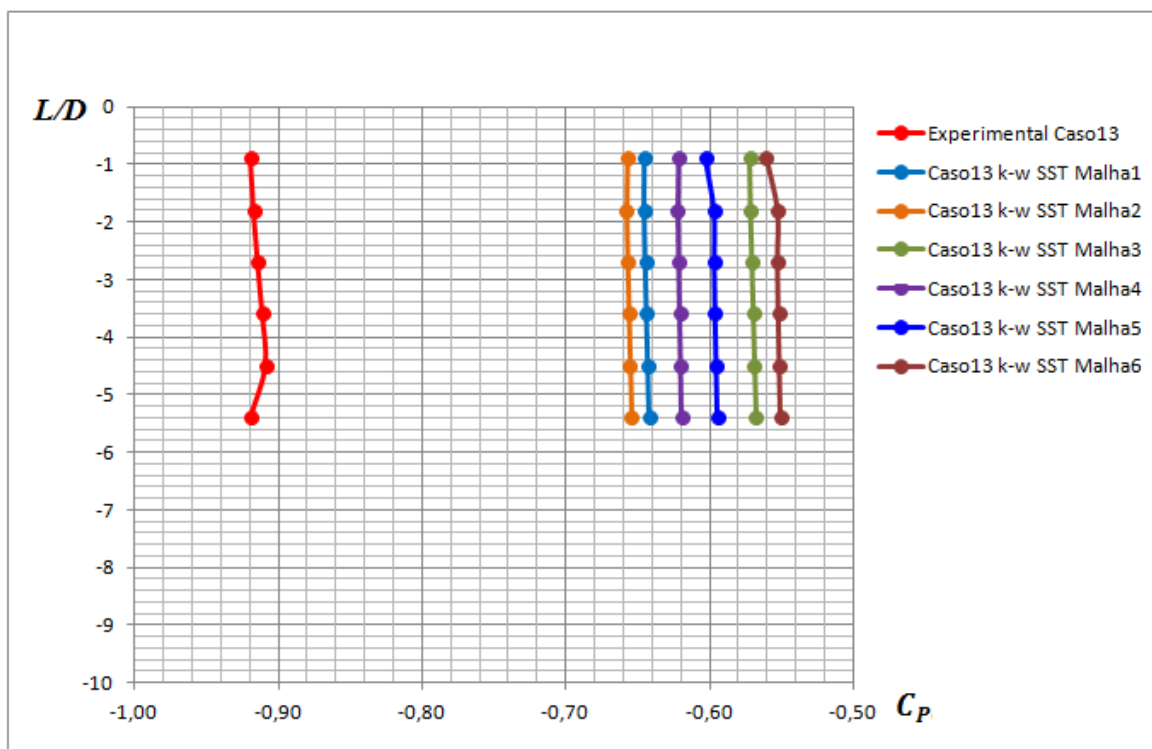


Figura 6.29 – Variação do C_p com a altura adimensional para o caso 13

Tomada de pressão	Malha1	Malha2	Malha3	Malha4	Malha5	Malha6
P1	29,83%	28,52%	37,80%	32,38%	34,41%	39,04%
P2	29,65%	28,28%	37,71%	32,15%	34,91%	39,75%
P3	29,51%	28,13%	37,59%	32,01%	34,73%	39,55%
P4	29,34%	27,96%	37,46%	31,84%	34,56%	39,40%
P5	29,27%	27,87%	37,41%	31,77%	34,49%	39,33%
P6	30,18%	28,80%	38,23%	32,65%	35,32%	40,11%

Tabela 6.3 – Erros relativos do caso 13

Caso 14

Assim como no caso 13 o caso 14 também está localizado numa zona de grande instabilidade da curva de funcionamento. Analisando a figura 6.30 é possível observar que a malha 1, ainda que esteja um pouco distante, é a que se encontra mais próxima da curva experimental, apresentando um erro relativo a variar entre 25,70% e 27,83%. Os erros relativos para as restantes malhas do caso 14 podem ser consultados na tabela 6.4.

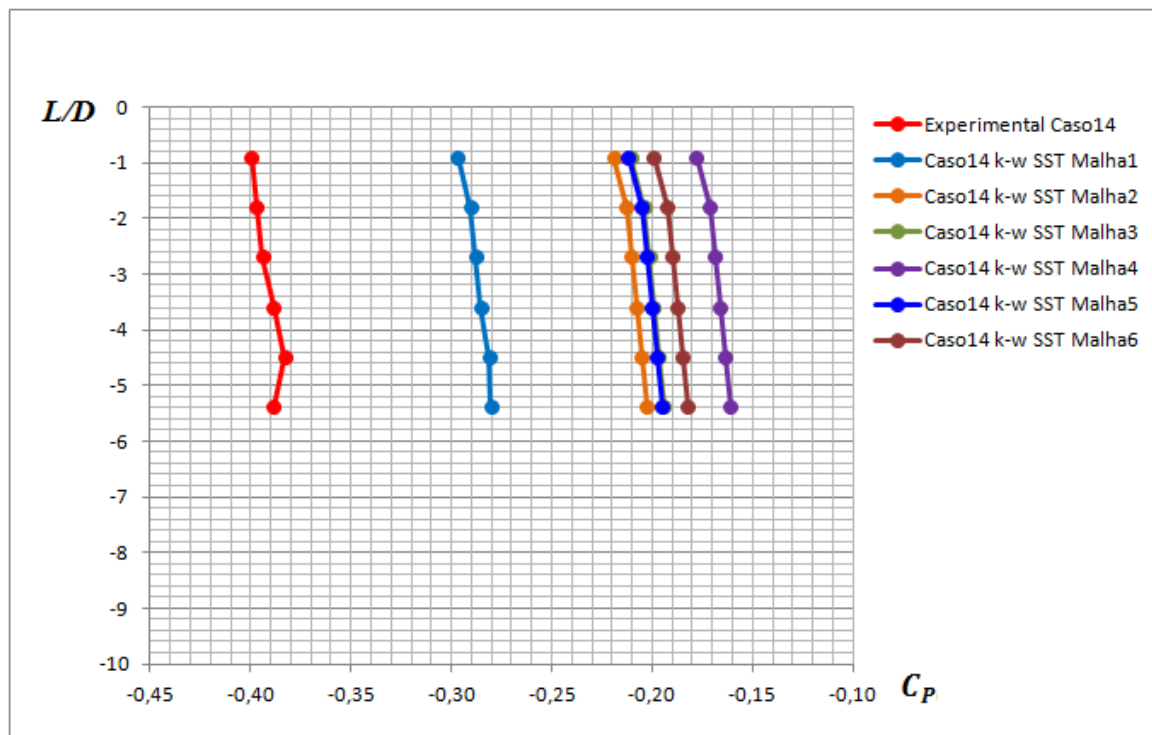


Figura 6.30 – Variação do C_p com a altura adimensional para o caso 14

Tomada de pressão	Malha1	Malha2	Malha3	Malha4	Malha5	Malha6
P1	25,70%	45,13%	47,30%	55,48%	46,95%	50,18%
P2	26,83%	46,38%	48,62%	56,82%	48,29%	51,51%
P3	26,93%	46,63%	48,88%	57,16%	48,59%	51,83%
P4	26,50%	46,50%	48,76%	57,19%	48,50%	51,79%
P5	26,60%	46,39%	48,67%	57,26%	48,43%	51,76%
P6	27,83%	47,85%	50,06%	58,57%	49,84%	53,13%

Tabela 6.4 – Erros relativos do caso 14

Capítulo 7

Conclusões

O *CFD* é uma ferramenta que tem ganho muita importância com o passar dos anos, é uma mais-valia no que toca a simulação numérica, capaz de resolver uma grande variedade de problemas de escoamentos de dinâmica dos fluidos, permitindo prever eventuais falhas ou melhorias a fazer, em casos já existentes ou noutros ainda em fase de projecto.

O presente estudo teve como objectivo a reprodução do trabalho experimental elaborado por José Dias *et al.* (comunicação privada), no túnel de vento do LNEC, utilizando para isso os softwares de modelação e simulação numérica, *GAMBIT* (versão 2.2.30) e *FLUENT* (versão 6.3.26), para verificar deste modo, até que ponto os dados recolhidos experimentalmente coincidem com os dados numéricos.

Com este fim, foram elaboradas inicialmente duas malhas bidimensionais no *GAMBIT*, para ganhar alguma sensibilidade na discretização espacial do domínio de cálculo. Na construção das malhas tridimensionais a distância entre a chaminé e a saída do túnel de vento foi encurtada, tendo em conta os resultados obtidos no estudo 2D, pois o escoamento já estava completamente desenvolvido mesmo antes de chegar ao final do túnel. Esta diminuição do comprimento do túnel contribuiu para que houvesse uma redução no número de elementos e no tempo de cálculo. Houve a necessidade de discretizar bem as zonas junto de paredes e nos locais onde ocorrem formações de vórtices, para obter a maior precisão possível dos resultados numéricos.

O software *FLUENT* permitiu importar as malhas construídas no *GAMBIT*, onde foram aplicadas as condições de fronteira do domínio, onde foram escolhidos o algoritmo numérico de acoplamento pressão-velocidade e o algoritmo de discretização, os modelos de turbulência são outra escolha importante a ser feita, uma vez que cada modelo está direccionado de certa forma para casos específicos de escoamentos.

Numa fase inicial os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ (Standard, RNG e Realizable) e $k-\omega$ (Standard e SST), foram apenas testados para a malha 1 tridimensional. Após analisar os modelos de turbulência que melhor se adaptavam ao estudo, foram escolhidos os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ Standard e $k-\omega$ SST para depois simular o problema para as restantes malhas tridimensionais, apenas para os modelos de turbulência escolhidos. Para além da escolha do modelo de turbulência, um dos objectivos foi também estudar a independência das malhas face aos resultados obtidos. Das malhas tridimensionais a malha 3 foi aquela que apresentou resultados mais próximos dos resultados experimentais, comparando os resultados desta malha para os modelos de turbulência escolhidos, observa-se que o modelo $k-\varepsilon$ Standard se assemelha mais à parte negativa do eixo U_c/U_v (figura 6.1), correspondente às situações em que o ar está a ser aspirado para o interior da chaminé, e o modelo $k-\omega$ SST aproxima-se mais dos valores experimentais pelo lado positivo do eixo U_c/U_v (figura 6.2), correspondente aos casos em que o ar é extraído da chaminé.

De modo a estudar a evolução do escoamento no interior da chaminé foram analisados alguns casos presentes no gráfico 4.3 que representa a curva experimental de funcionamento, onde esta foi dividida em 6 intervalos:

($U_c/U_v < 0$; $U_c/U_v = 0$; $0 < U_c/U_v < 0,6$; $0,6 < U_c/U_v < 1,5$; $1,5 < U_c/U_v < 2$; $U_c/U_v > 2$), como pode ser observado na figura 6.3. Foram escolhidos 9 casos, presentes nestes intervalos e posteriormente analisados os planos de simetria Y.

Na primeira parte do gráfico, em $U_c/U_v < 0$, observa-se que uma parte do escoamento proveniente da entrada do túnel de vento é aspirado para o interior da chaminé, devido à velocidade de sucção que foi imposta na base da mesma. A aspiração ocorre do junto à parede interior direita pois o escoamento ao entrar na chaminé na chaminé separa-se ao passar pela aresta viva no topo desta, originando vórtices no interior da chaminé no lado oposto ao qual o escoamento está a entrar.

No intervalo $U_c/U_v = 0$, a velocidade na chaminé é nula, no entanto há formação de vórtices no seu interior devido à interação do escoamento do túnel de vento com o topo da chaminé

Para os casos pertencentes ao intervalo $0 < U_c/U_v < 0,6$ já é imposta velocidade na base da chaminé, ainda que pequena. O escoamento no interior da chaminé mantém-se praticamente uniforme para estes casos, à excepção do caso 12, onde o escoamento sobe pelo lado esquerdo da chaminé, chegando ao topo este entra em contacto com o escoamento proveniente da entrada do túnel de vento que vai provocar um vórtice no interior da chaminé, do lado direito próximo da saída da chaminé. Começa-se a notar um crescimento da pluma e um achatamento à medida que a velocidade imposta na chaminé também aumenta, é também notória a subida da bolha de recirculação a sotavento.

O caso presente no intervalo $0,6 < U_c/U_v < 1,5$ corresponde à igualdade entre a velocidade de imposta na chaminé e a velocidade de entrada do escoamento no túnel de vento. O crescimento da pluma é notável a partir do momento em que os dois escoamentos se encontram à saída da chaminé, tendo um crescimento tanto em altura como em extensão, para além disso deixa de estar numa posição horizontal ganhando uma acentuação na sua inclinação.

Entre o intervalo $1,5 < U_c/U_v < 2$, a velocidade imposta na chaminé já é superior à da entrada do túnel de vento, o escoamento que sai da chaminé tende logo a curvar para a direita formando uma pluma acentuada que vai subindo desde a saída da chaminé até à saída do túnel. A recirculação que se forma a sotavento da chaminé começa a afastar.

Finalmente para $U_c/U_v > 2$, para além do escoamento que sai da chaminé ser bastante acentuado na formação da pluma, a zona de recirculação que se formava à saída da chaminé já pouco se nota.

Analisada a evolução do escoamento no interior da chaminé ao longo do eixo U_c/U_v , fez-se a análise da evolução do escoamento em planos corte em Z para perceber como se comporta o escoamento nas várias secções da chaminé ao longo dos vários casos, e entre que cotas mantém simetria em relação ao eixo Y. Apenas nos casos em que a velocidade é nula ou de fraca intensidade onde não se verifica uma simetria no interior da chaminé (caso 11 e caso 12), os restantes casos apresentam uma boa simetria, isto apenas no interior da chaminé, pois a zona da esteira só começa a ter um comportamento simétrico a partir do caso 14.

Houve a preocupação de adimensionalizar a variação de pressão (ΔP) nas tomadas de pressão em função da pressão dinâmica do vento (q_v). A altura da chaminé (L) também foi adimensionalizada em função do seu diâmetro (D). Desta forma foram feitos 4 gráficos que relacionam o coeficiente de pressão (C_p) com a altura adimensional da chaminé (L/D) para os casos 11, 12, 13 e 14, de modo a analisar a variação do coeficiente de pressão com a altura da chaminé.

Para o caso 11 os resultados são bastantes aproximados para todas as malhas estudadas, no entanto a que mais se aproxima é a malha 3, com um menor erro relativo a variar entre 0,45% e 3,69%.

No caso 12 nota-se um maior afastamento dos resultados obtidos. As duas malhas que se encontram mais próximas são as malhas 5 e 3 com uma diferença mínima de erros relativos. A malha 5 apresenta um erro relativo que varia entre 5,51% e 9,10%, enquanto a malha 3 varia entre 5,60% e 9,12%.

Em relação aos casos anteriores, o caso 13 apresenta uma maior diferença nos resultados obtidos, devido ao facto de se encontrar localizado numa zona mais instável da curva de funcionamento. As malhas mais próximas da curva experimental são as malhas 2 e 1, com erros relativos a variar entre 27,87% e 28,80%, 29,27% e 30,18%, respectivamente.

Por fim o caso 14, assim como o caso 13, também está localizado numa zona de grande instabilidade da curva de funcionamento. A malha 1, ainda que um pouco distante, é a malha que mais se aproxima da curva experimental, com um erro relativo a variar entre 25,70% e 27,83%.

Apesar de se tratar de um escoamento transitório, deu para ser estudado em regime estacionário, pois interessava estudar essencialmente o comportamento no interior da chaminé.

Em trabalhos futuros seria interessante fazer-se o estudo da mesma chaminé, inserida em vários tipos de terreno (grandes cidades, subúrbios, aldeias, florestas, zonas com pouca vegetação, planícies e zonas desertas), utilizando para isso os vários valores de rugosidade do terreno e analisar até que ponto seria necessário aumentar a altura da chaminé de maneira a ocorrer uma menor perturbação do escoamento à saída e da esteira.

Seria também interessante estudar a variação do número de Strouhal, para poder analisar a frequência de desprendimento de vórtices, pois este parâmetro está intimamente relacionado com o carregamento dinâmico da estrutura. Por fim identificar quantos modos distintos de desprendimento de vórtices existem.

Outra ideia interessante, seria a aplicação da chaminé a um caso de estudo, como fazer o estudo desta mesma chaminé inserida numa habitação, estudando o seu comportamento e a sua influência na ventilação natural.

Referências Bibliográficas

Bakker A., Marshall E.M. (2004) *Computational Fluid Dynamics. Encyclopedia of Chemical Processing*. Editor Prof. Sunggyu Lee. Marcel Dekker Inc. New York.

Chen Z.D., Bandopadhyay P., Halldorsson J., Byrjalsen C., Heiselberg P., Li Y. (2002). *An experimental investigation of solar chimney model with uniform wall heat flux*. Journal of Building and Environmental, volume 38, páginas 893-906.

Dias Delgado J.F.A., Janeiro Borges A.R., Paixão Conde J.M. (1996). *Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of two-storey building communicating with the outside environment by a chimney*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, volume 65, páginas 371-381.

Fluent 6.3. (2006). *User's Guide*, Fluent Incorporated.

Gambit 2.2. (2004). *Tutorial Guide*, Fluent Incorporated.

Huynh, P. (2010). *A report on the windcatcher*. University of Technology, Sydney, Australia.

Jones, B. M. (2010). *Quantifying the performance of natural windcatchers*. School of Engineering and Design, Burnel University.

Lee, K. H., Strand, R. K. (2008). *Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney*. United States. Journal of Energy and buildings, volume 41, páginas 615-621.

Loredo Souza, A. M., Schettini, E. B. C., Paluch, M. J. (2004). *Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento*. In: Möller, S. V., Silvestrini, J. H. Turbulência. Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Brasil.

Loureiro, J. N. L. (2008). *Caracterização do comportamento de ventiladores estáticos*, Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. (2003). *Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model*, Software Development, ANSYS - CFX, 83174 Otterfing, Germany.

Montazeri, H. (2010). *Experimental and numerical study on ventilation performance of various multi opening wind catchers*. Department of Mechanics Engineering School of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. Journal of Building and Environment, volume 46, páginas 370-378.

Pfeiffer A., Dorer V., Weber A. (2007). *Modelling of cowl performance in building simulation tools using experimental data and computational fluid dynamics*. Duebendorf, Switzerland.

Pitarma, R.A., Gaspar P.D. (2003). *Esquemas de Discretização em Escoamentos com Regime de Convecção Mista: Estudo de Caso*, 3^{as} Jornadas Politécnicas de Engenharia Mecânica, Automóvel, Organização e Gestão Industrial, Energia e Ambiente. ISEC – Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, Portugal

Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman Scientific and Technical.

White, F. M. (1999). *Fluid Mechanics* 4th Edition

Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Inc., La Canada, California.

Wong, H. N., Heryanto, S. (2004). *The study of active effect to enhance natural ventilation using wind tunnel and computational fluid dynamics (CFD) simulations*. Journal of Energy and Buildings, volume 36, páginas 668-678.

Wood Heat Organization Website (2011). *How wind affects chimney performance*. Acedido em 13 de Agosto de 2011, em: <http://woodheat.org>

Anexos

Anexo A

Modelo k - ϵ RNG

Modelação da viscosidade efectiva

O método de eliminação de escala na teoria RNG resulta numa equação diferencial para a viscosidade turbulenta:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\epsilon \mu}}\right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (\text{A.1})$$

onde

$$\hat{v} = \mu_{eff}/\mu \quad (\text{A.2})$$

$$C_v \approx 100 \quad (\text{A.3})$$

A equação A.1 é integrada para obter uma descrição exacta de como o transporte da turbulência efectiva varia com o número de Reynolds eficaz (ou dimensão do remoinho), permitindo assim que o modelo lide melhor com baixos valores do número de Reynolds e com escoamentos próximos de parede.

No limite máximo do número de Reynolds, a equação A.1 dá:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (\text{A.4})$$

com $C_\mu = 0,0845$, derivada usando a teoria RNG. É interessante notar que este valor de C_μ é muito próximo do valor empiricamente determinado de 0,09 usado no modelo k - ϵ standard.

Modificação do remoinho RNG

A turbulência, em geral, é afectada pela rotação ou por remoinhos no centro do escoamento. O modelo RNG no *Fluent* contém uma opção para alterar os efeitos de remoinho ou rotação, modificando a viscosidade turbulenta adequadamente. A modificação toma a seguinte forma funcional:

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\epsilon}\right) \quad (\text{A.5})$$

Quando o modelo RNG é utilizado, esta modificação no remoinho toma sempre uma posição axissimétrica. Para escoamentos com rotação suave o valor padrão utilizado pelo *Fluent*, para α_s é 0,07. No entanto, para escoamentos com uma rotação mais forte, pode ser utilizado um maior valor para α_s .

Cálculo do inverso dos números de Prandtl

Os inversos dos números de Prandtl, α_k e α_ε , são calculados usando a seguinte fórmula derivada analiticamente pela teoria RNG:

$$\left| \frac{\alpha - 1,3929}{\alpha_0 - 1,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{\alpha + 2,3929}{\alpha_0 + 2,3929} \right|^{0,3678} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (A.6)$$

onde $\alpha_0 = 1$. Para o limite máximo do número de Reynolds

$$(\mu_{mol}/\mu_{eff} \ll 1), \alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1,393. \quad (A.7)$$

Termo R_ε na equação de ε

A maior diferença entre os modelos $k-\varepsilon$ RNG e standard está no termo adicional da equação de ε , dado por:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (A.8)$$

$$\text{onde } \eta \equiv Sk/\varepsilon, \eta_0 = 4,38, \beta = 0,012. \quad (A.9)$$

Modelo $k-\varepsilon$ Realizable

Modelação da viscosidade turbulenta

Como nos outros modelos $k-\varepsilon$ a viscosidade turbulenta, μ_t é calculada pela equação 2.7.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

A diferença entre o modelo $k-\varepsilon$ Realizable e os modelos $k-\varepsilon$ Standard e RNG é que C_μ já não é constante. É calculado pela seguinte equação:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU_*}{\varepsilon}} \quad (A.10)$$

Onde

$$U * \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (\text{A.11})$$

e onde

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \\ \Omega_{ij} &= \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Onde $\overline{\Omega_{ij}}$ representa a taxa média de rotação do tensor visualizado no referencial em rotação, com velocidade angular ω_k . As constantes do modelo são dadas por:

$$A_0 = 4,04, \quad A_s = \sqrt{6}\cos\phi \quad (\text{A.13})$$

Onde

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (\text{A.14})$$

Modelação da produção de turbulência nos modelos $k-\varepsilon$

O termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta, e é calculado de forma semelhante para os modelos $k-\varepsilon$ standard, RNG e realizable. Da equação exacta do transporte de k , esse termo pode ser obtido por:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{A.15})$$

Onde, u'_i e u'_j se referem às flutuações a que estão a ser submetidos os gradientes médios de velocidade.

Para avaliar G_k de forma consistente com a hipótese de Boussinesq, que relaciona as tensões de Reynolds com os gradientes médios de velocidade:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (\text{A.16})$$

onde S é o módulo do tensor da taxa de deformação, definido como:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (\text{A.17})$$

e onde

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (\text{A.18})$$

Modelo $k-\omega$ Standard

Modelação da difusibilidade efectiva

As difusibilidades efectivas para o modelo $k-\omega$ são dadas por:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (\text{A.19a})$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (\text{A.19b})$$

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada combinando k e ω da seguinte maneira:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (\text{A.20})$$

O coeficiente α^* amortece a viscosidade turbulenta, fazendo assim uma correcção para baixos números de Reynolds.

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (\text{A.21})$$

Onde,

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (\text{A.22})$$

$$Re_k = 6 \quad (\text{A.23})$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (\text{A.24})$$

$$\beta_i = 0,072 \quad (\text{A.25})$$

É de notar que para altos números de Reynolds no modelo $k-\omega$, $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$.

Modelação da produção de turbulência

O termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta e é calculado da mesma forma que nos modelos $k-\varepsilon$ como se pode ver na equação A.15.

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{A.26})$$

O termo G_ω representa a produção de ω e é dado por

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (\text{A.27})$$

O coeficiente α é dado por:

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega} \right) \quad (\text{A.28})$$

Onde $R_\omega = 2,95$. α^* e Re_t são dados pelas equações A.21 e A.22.

É de notar que para altos números de Reynolds no modelo $k-\omega$, $\alpha = \alpha_\infty = 1$.

Modelação da dissipação da turbulência

A dissipação de k é dada por

$$Y_k = \rho \beta^* f_\beta k \omega \quad (\text{A.29})$$

Onde

$$f_\beta^* = \begin{cases} 1, & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680\chi_k^2}{1 + 400\chi_k^2}, & \chi_k > 0 \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

$$\beta^* = \beta_i^* \quad (\text{A.31})$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left[\frac{4/15 + (Re_t/R_\beta)^4}{1 + (Re_t/R_\beta)^4} \right] \quad (\text{A.32})$$

$$\chi_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{A.33})$$

$$R_\beta = 8 \quad (\text{A.34})$$

$$\beta_\infty^* = 0,09 \quad (\text{A.35})$$

Onde Re_t é calculado pela equação A.22.

A dissipação de ω é dada por

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (\text{A.36})$$

onde

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega} \quad (\text{A.37})$$

$$\chi_\omega = \left[\frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\infty^*\omega)^3} \right] \quad (\text{A.38})$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A.39})$$

$$\beta = \beta_i \quad (\text{A.40})$$

Sendo que S_{ij} , β_i^* são calculados pelas equações A.18 e A.32 respectivamente.

Constantes do modelo

$$\begin{aligned} \alpha_\infty^* = 1, \quad \alpha_\infty = 0,52, \quad \alpha_0 = \frac{1}{9}, \quad \beta_\infty^* = 0,09, \quad \beta_i = 0,072, \quad R_\beta = 8, \\ R_k = 6, \quad R_\omega = 2,95, \quad \sigma_k = 2, \quad \sigma_\omega = 2 \end{aligned} \quad (\text{A.41})$$

Modelo k - ω STT

Modelação da difusibilidade efectiva

As difusibilidades efectivas, Γ_k e Γ_ω para o modelo k - ω SST são calculadas da mesma forma que no modelo k - ω Standard, pelas equações A.19a e A.19b

Onde a viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada da seguinte forma:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1\omega} \right]} \quad (\text{A.42})$$

Os números de Prandtl turbulentos, σ_k e σ_ω podem ser obtidos por:

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (\text{A.43})$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (\text{A.44})$$

α^* é definida na equação A.21. As funções de mistura, F_1 e F_2 são dadas por:

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (\text{A.45})$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (\text{A.46})$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (\text{A.47})$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (\text{A.48})$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (\text{A.49})$$

Modelação da produção de turbulência

O termo \tilde{G}_k representa a produção de energia cinética turbulenta e é definido como:

$$\tilde{G}_k = \min (G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (\text{A.50})$$

Onde G_k é definido da mesma forma que no modelo k - ω Standard, como se pode ver na equação A.15.

O termo G_{ω} representa a produção de ω e é definido como:

$$G_{\omega} = \frac{\alpha}{v_t} G_k \quad (\text{A.51})$$

A formulação de G_{ω} é diferente entre os modelo k - ω Standard e SST. Outra diferença entre os dois modelos é o modo como α_{∞} é calculado, enquanto que no modelo k - ω Standard, α_{∞} é constante, para o modelo k - ω SST é dado pela equação A.52:

$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (\text{A.52})$$

onde

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (\text{A.53})$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (\text{A.54})$$

$$\kappa = 0.41 \quad (\text{A.55})$$

Modelação da dissipação turbulenta

A dissipação de k , Y_k , é dada de forma semelhante ao modelo $k-\omega$ Standard. A diferença está no termo f_{β^*} , que no modelo $k-\omega$ Standard é dado por função parcial, e no modelo $k-\omega$ SST tem um valor constante igual a 1.

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (\text{A.56})$$

A dissipação de ω , Y_ω , é dada de forma semelhante ao modelo $k-\omega$ Standard. A diferença está no cálculo dos termos β_i e f_β . No modelo $k-\omega$ Standard, β_i é definido como constante e f_β é definido pela equação A.37. No modelo $k-\omega$ SST, f_β é uma constante igual a 1 e β_i é definido pela equação A.58.

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2 \quad (\text{A.57})$$

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (\text{A.58})$$

Onde F_1 é obtido pela equação A.52.

Modificação da difusão cruzada

O modelo $k-\omega$ SST é baseado nos modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$ Standard. Para juntar os dois modelos, o modelo $k-\varepsilon$ Standard foi transformado com base nas equações de k e ω , que levam à introdução do termo de difusão cruzada, D_ω , definido por:

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{A.59})$$

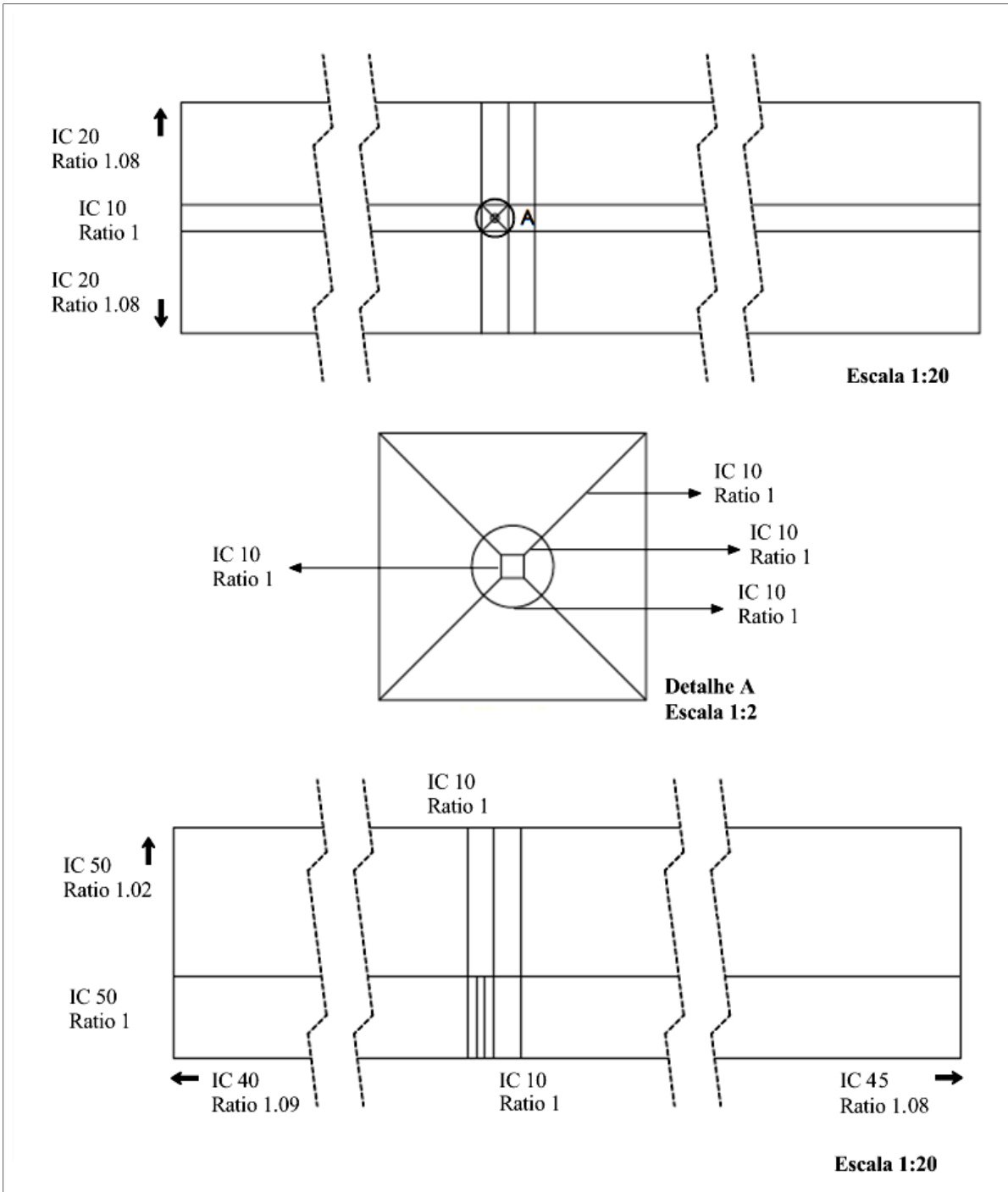
Constantes do modelo

$$\begin{aligned} \sigma_{k,1} &= 1,176, & \sigma_{\omega,1} &= 2,0, & \sigma_{k,2} &= 1,0, & \sigma_{\omega,2} &= 1,168 \\ a_1 &= 0,31, & \beta_{i,1} &= 0,075, & \beta_{i,2} &= 0,0828 \end{aligned} \quad (\text{A.60})$$

Todas as constantes adicionais do modelo (α_∞^* , α_∞ , α_0 , β_∞^* , β_i , R_β , R_k , R_ω) possuem os mesmos valores do modelo $k-\omega$ Standard.

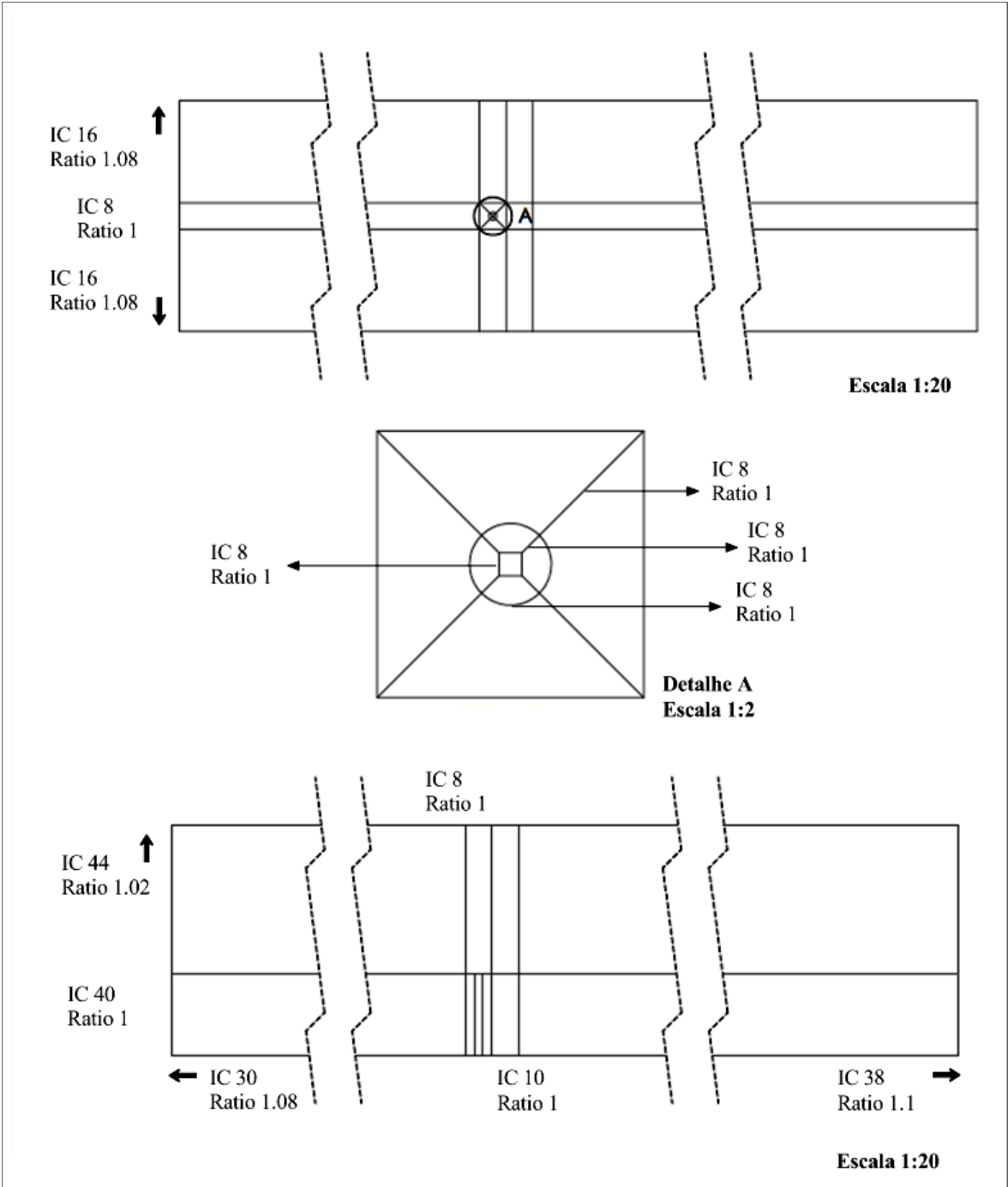
Anexo B

Malha 1 – 3D



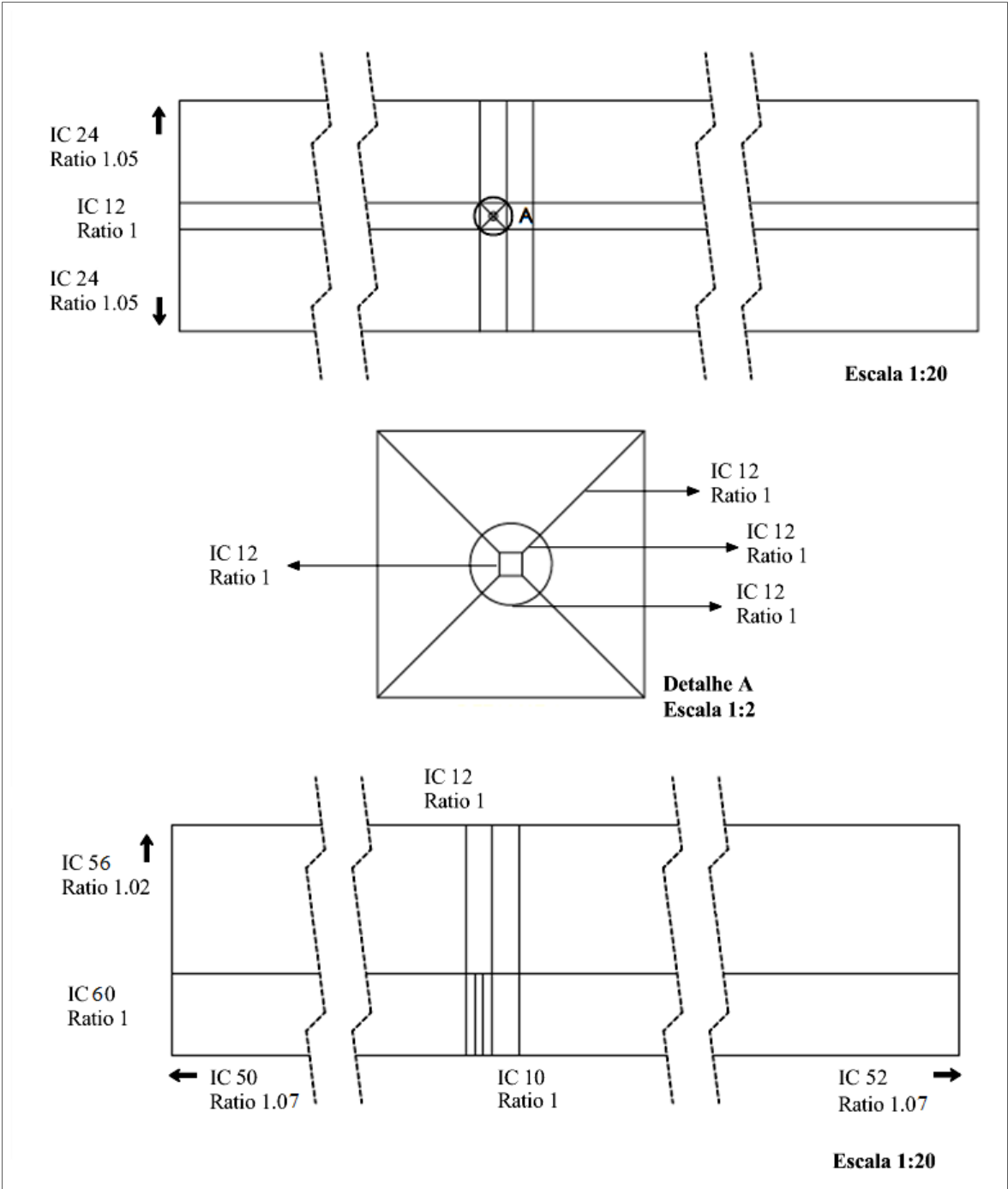
Nº Total de Elementos	Nº de Elementos no Tecto	Nº de Elementos na Chaminé
685000	6850	10500

Malha 2 – 3D



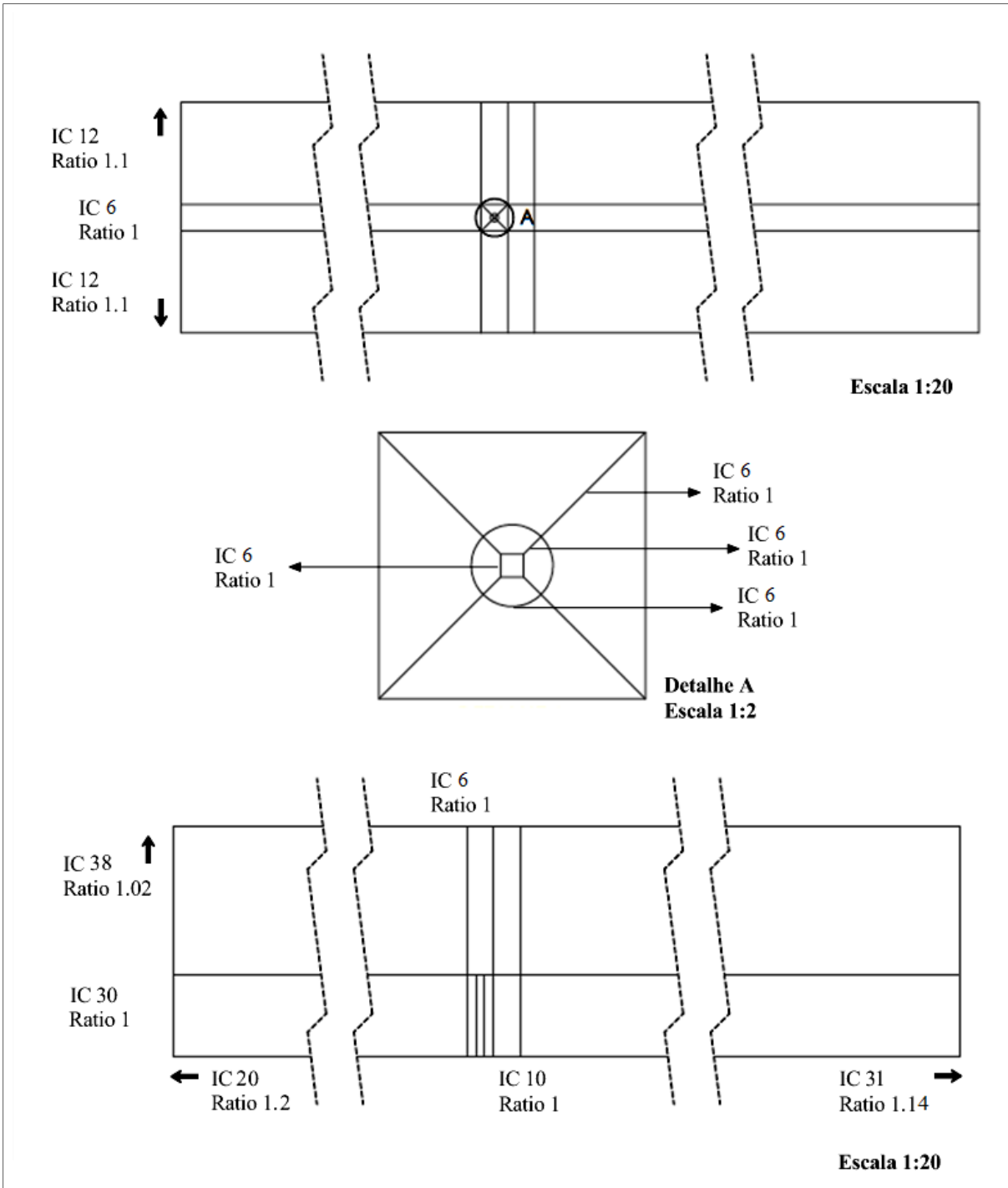
Nº Total de Elementos	Nº de Elementos no Tecto	Nº de Elementos na Chaminé
331968	3952	7224

Malha 3 – 3D



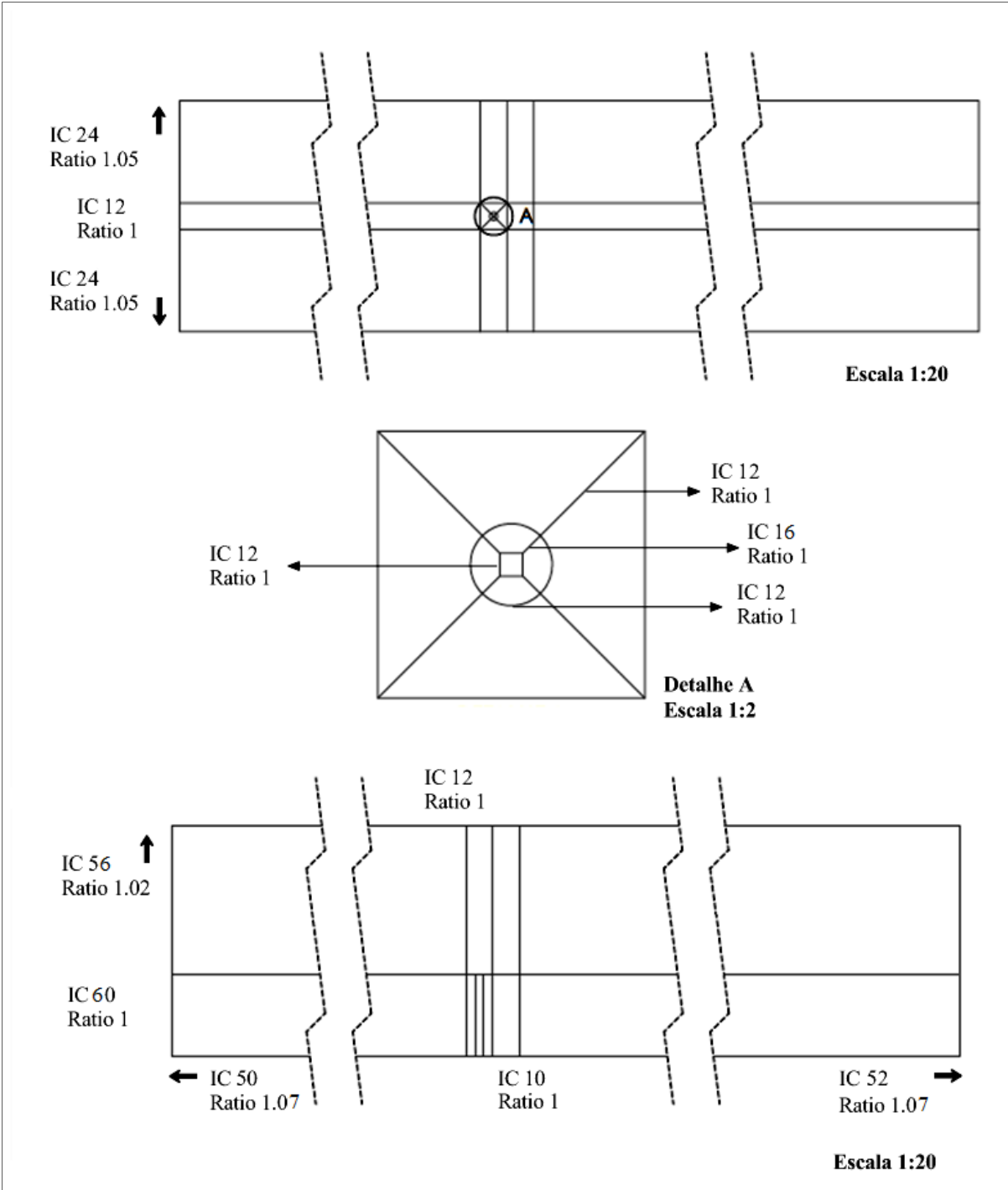
Nº Total de Elementos	Nº de Elementos no Tecto	Nº de Elementos na Chaminé
996672	8592	14384

Malha 4 – 3D



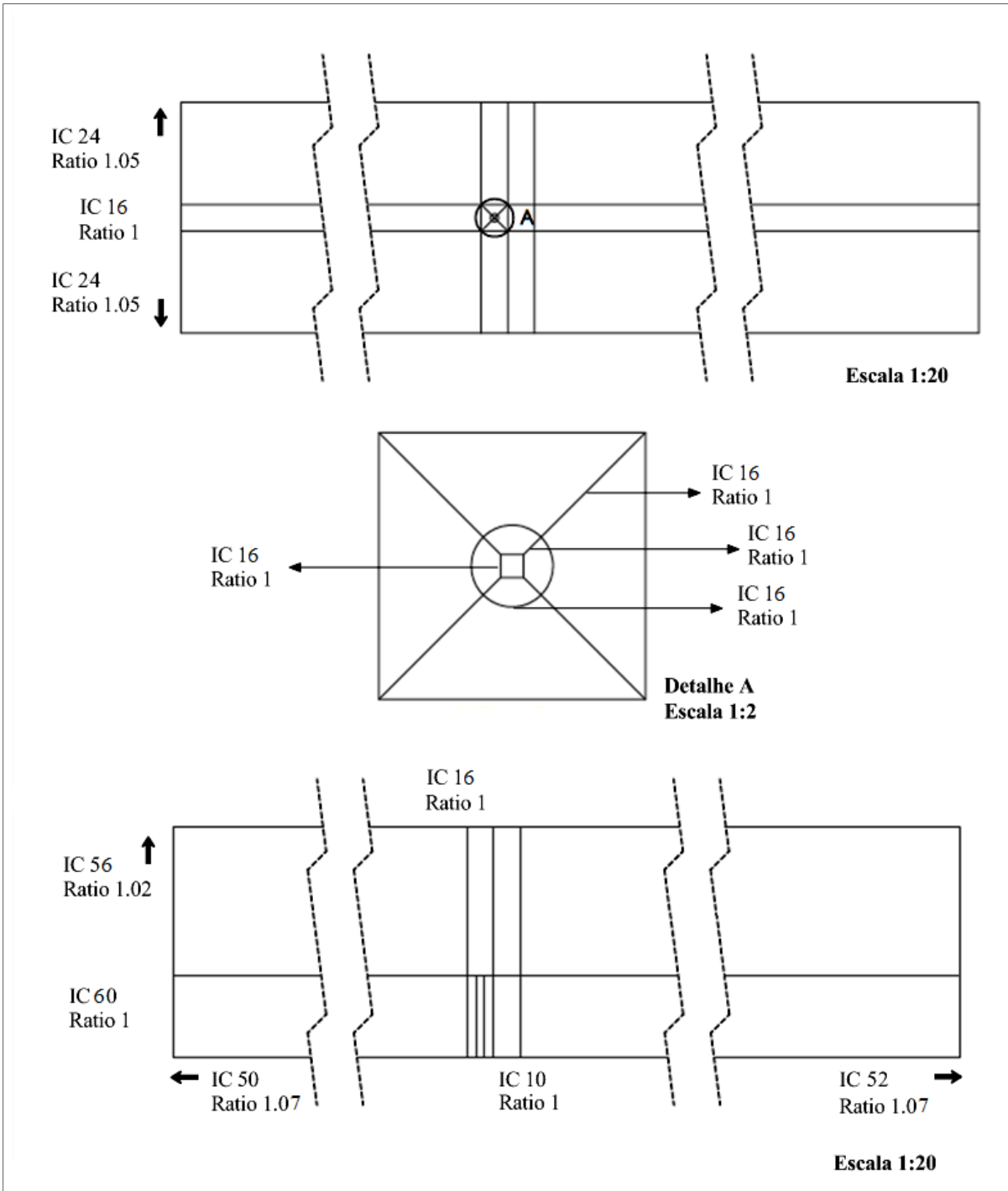
Nº Total de Elementos	Nº de Elementos no Tecto	Nº de Elementos na Chaminé
156264	2298	4556

Malha 5 – 3D



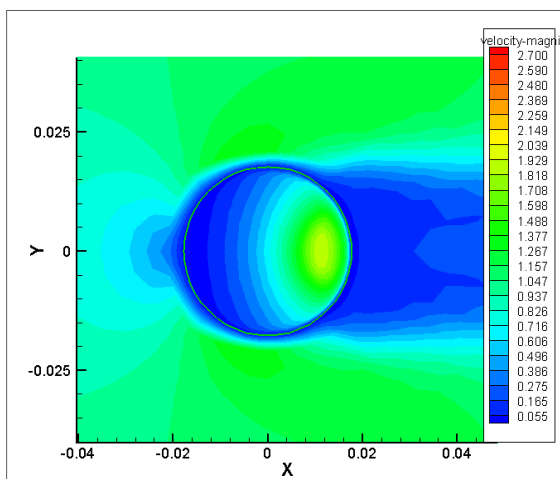
Nº Total de Elementos	Nº de Elementos no Tecto	Nº de Elementos na Chaminé
1018944	8784	14384

Malha 6 – 3D

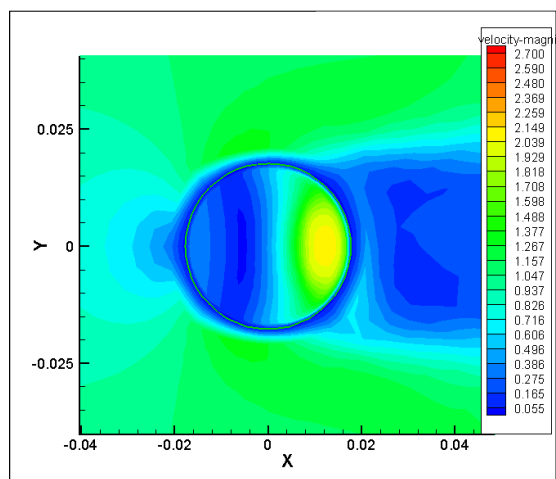


Nº Total de Elementos	Nº de Elementos no Tecto	Nº de Elementos na Chaminé
1187840	10240	14848

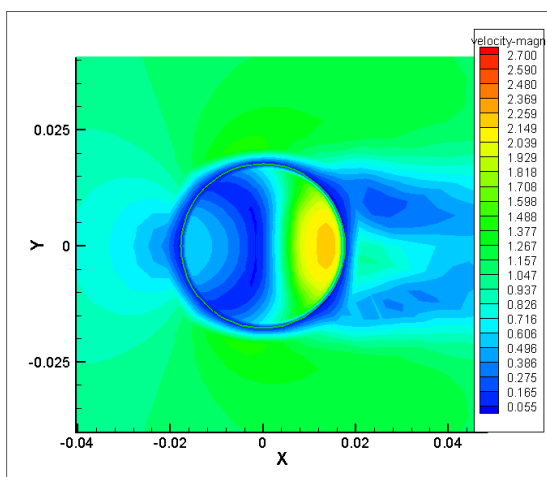
Anexo C



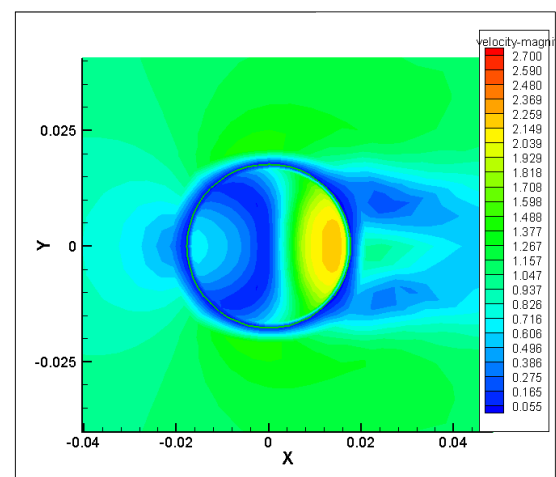
Caso 24, Corte em $Z=0,177$ m



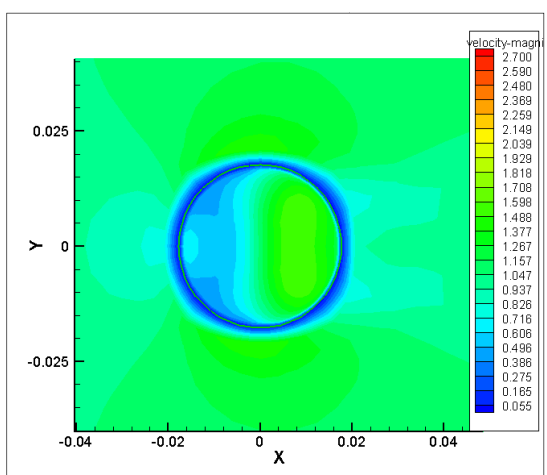
Caso 24, Corte em $Z=0,2655$ m



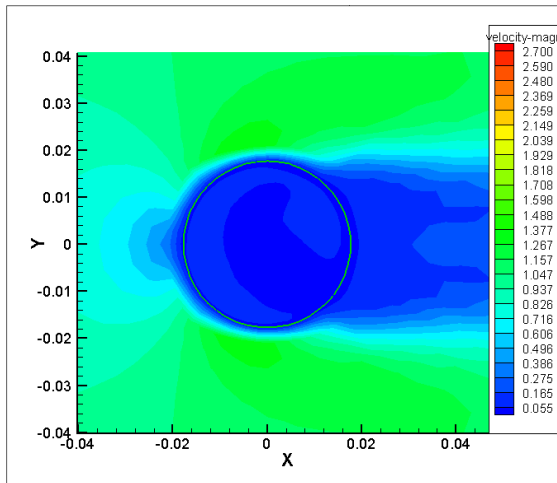
Caso 24, Corte em $Z=0,30975$ m



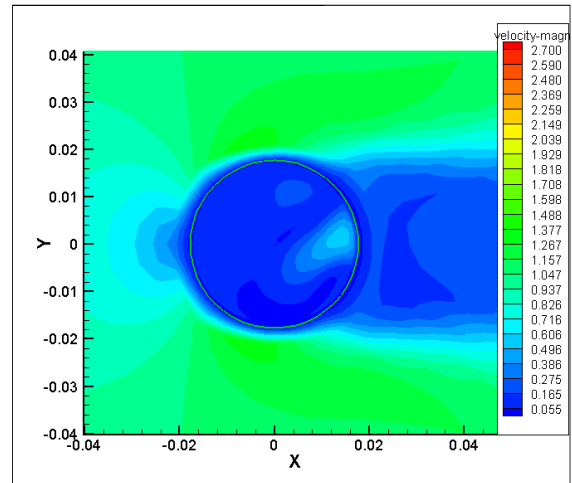
Caso 24, Corte em $Z=0,32$ m



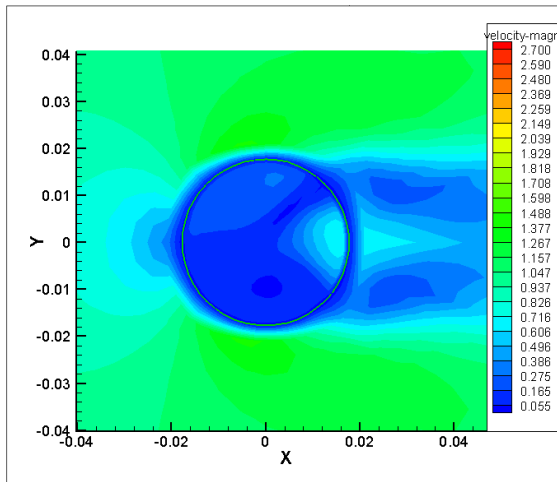
Caso 24, Corte em $Z=0,35$ m



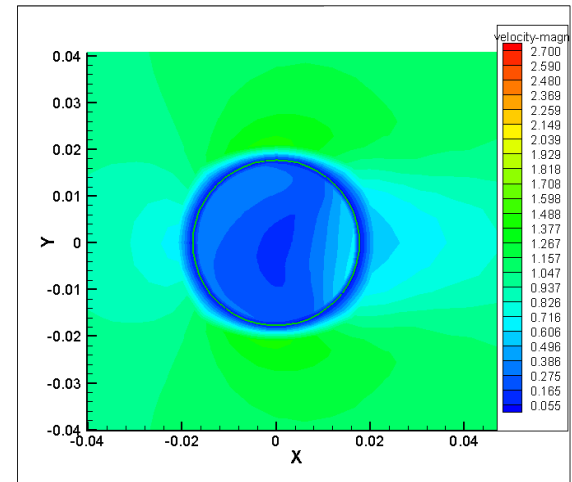
Caso 11, Corte em $Z=0.177$ m



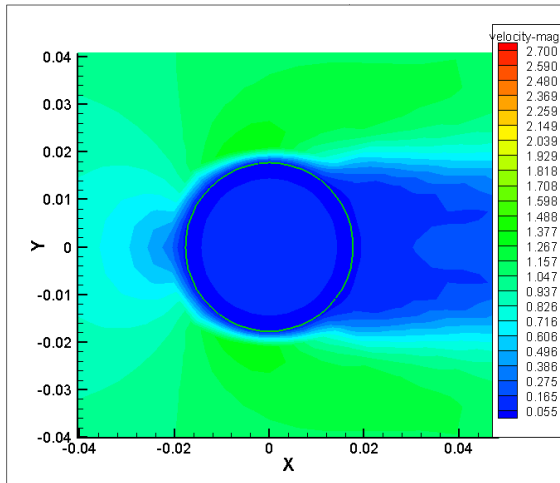
Caso 11, Corte em $Z=0.2655$ m



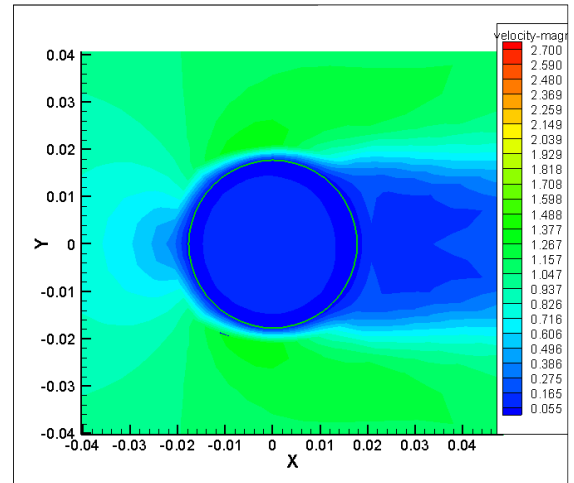
Caso 11, Corte em $Z=0.30975$ m



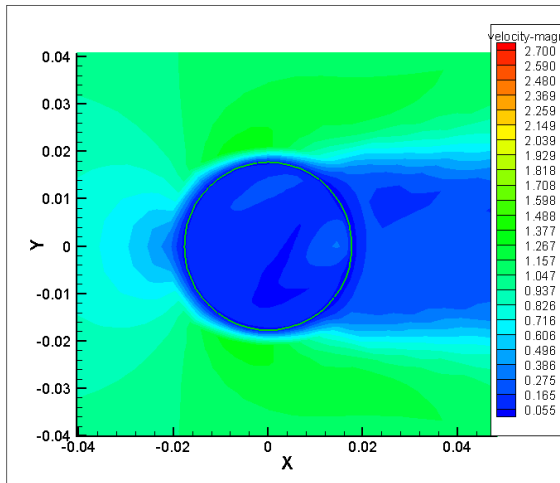
Caso11, Corte em $Z=0.35$ m



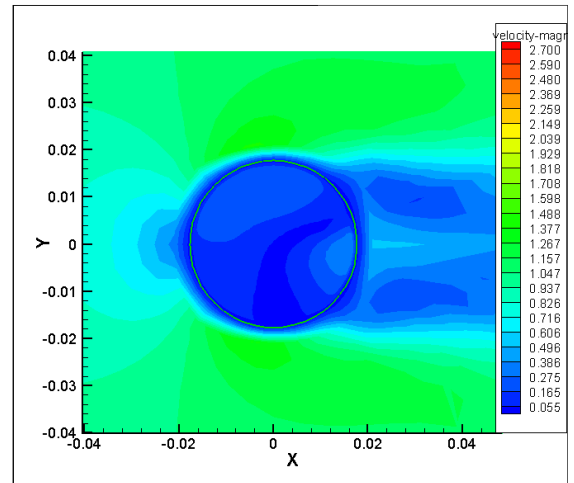
Caso 12, Corte em $Z=0,177$ m



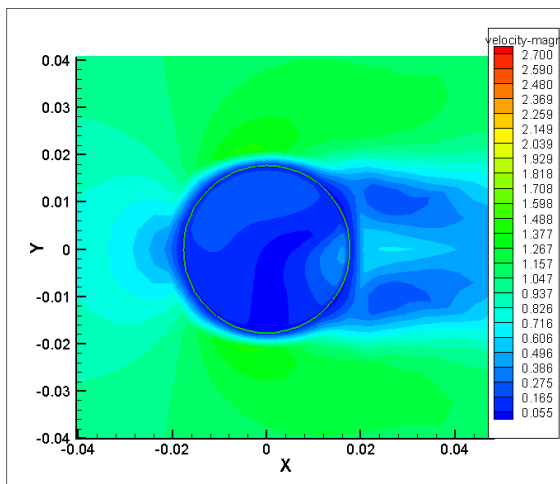
Caso 12, Corte em $Z=0,23$ m



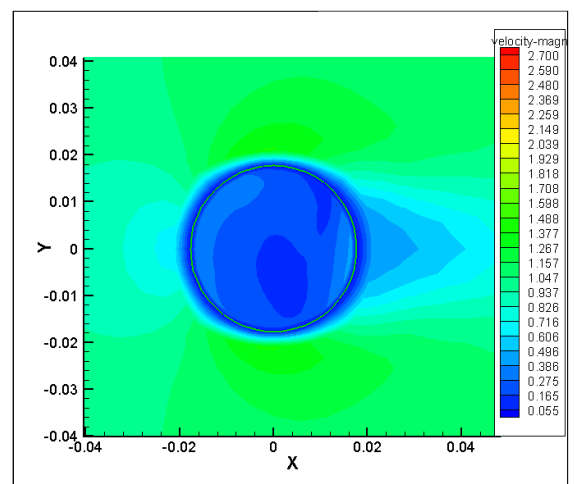
Caso 12, Corte em $Z=0,2655$ m



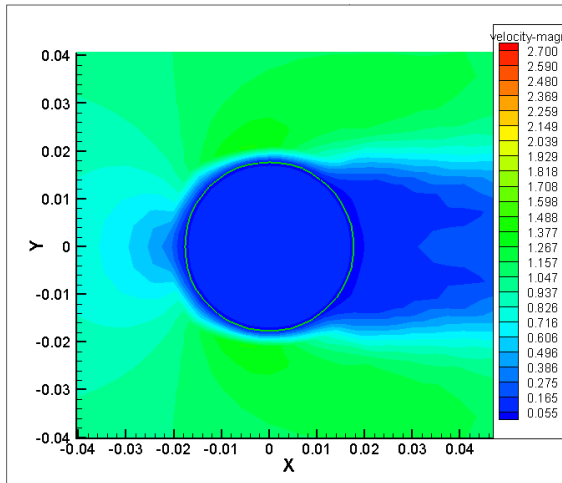
Caso 12, Corte em $Z=0,30975$ m



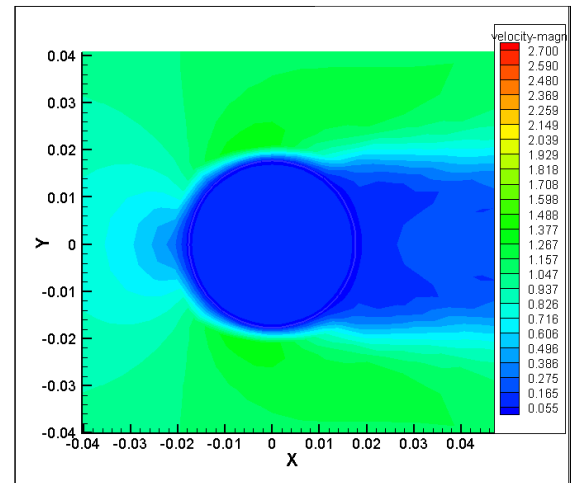
Caso 12, Corte em $Z=0,32$ m



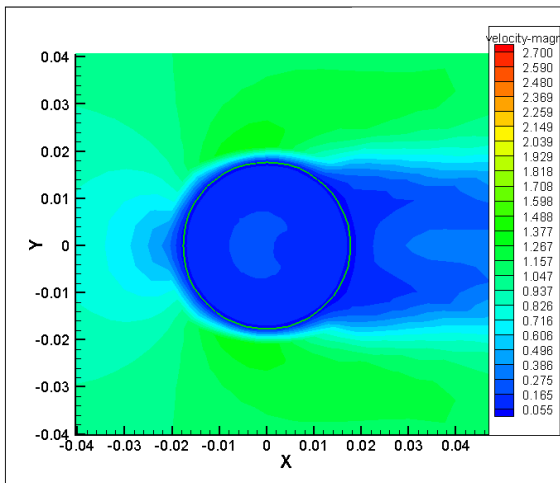
Caso 12, Corte em $Z=0,35$ m



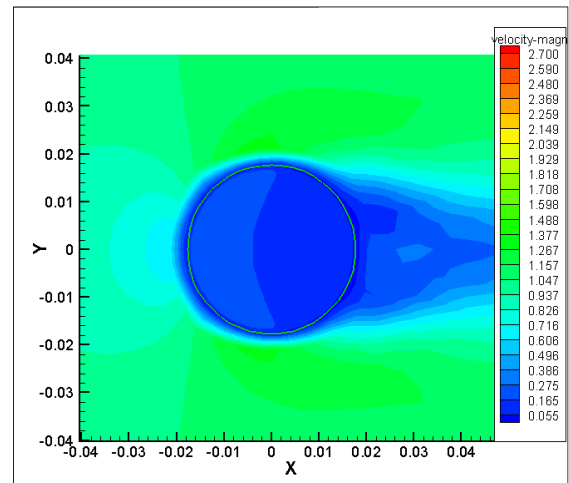
Caso 13, Corte em $Z=0,177$ m



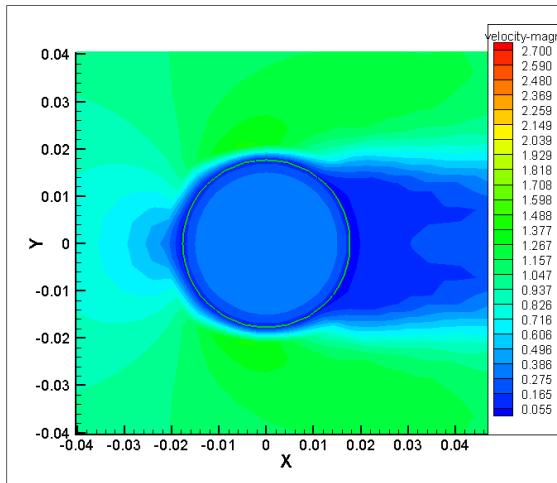
Caso 13, Corte em $Z=0,28$ m



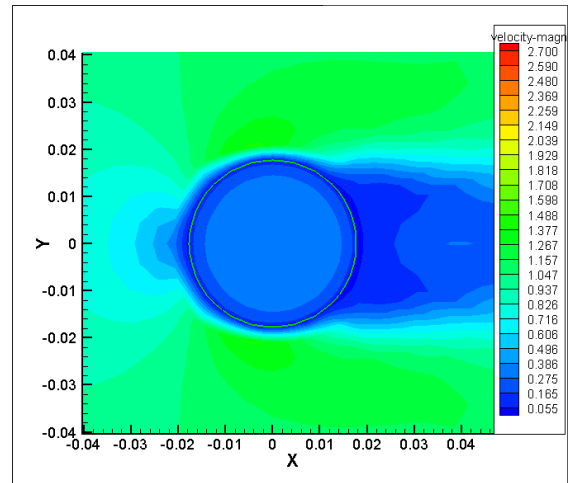
Caso 13, Corte em $Z=0,32$ m



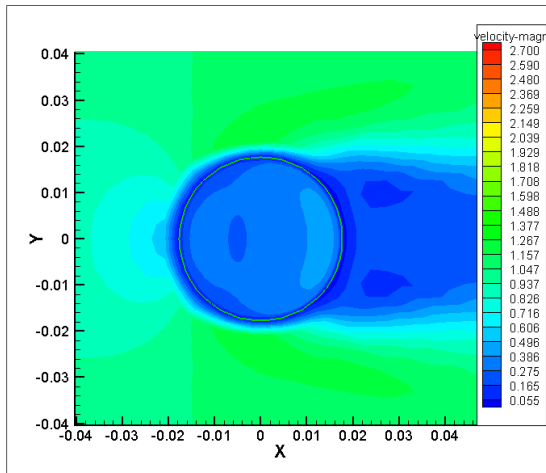
Caso 13, Corte em $Z=0,35$ m



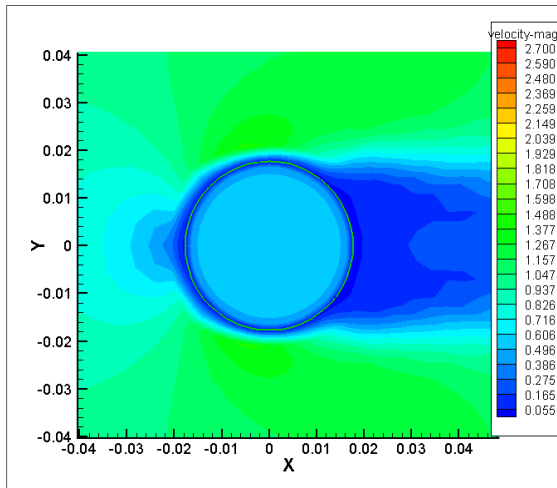
Caso 14, Corte em $Z=0,0177$ m



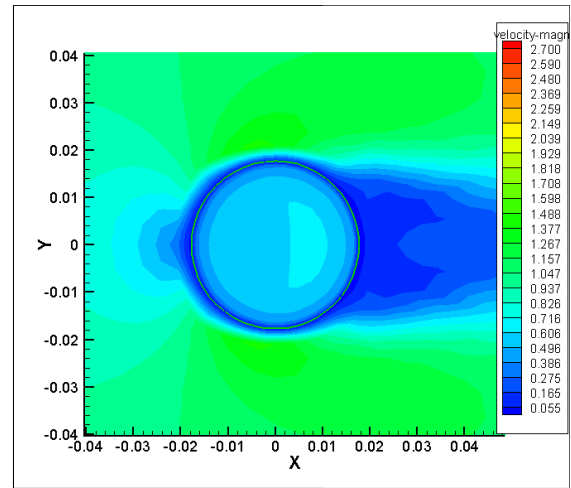
Caso 14, Corte em $Z=0,30975$ m



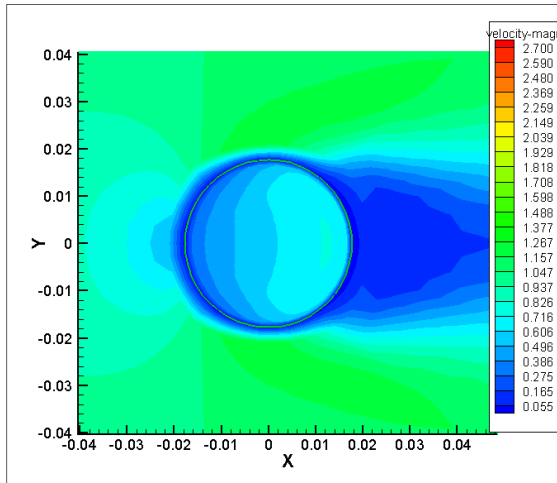
Caso 14, Corte em $Z=0,35$ m



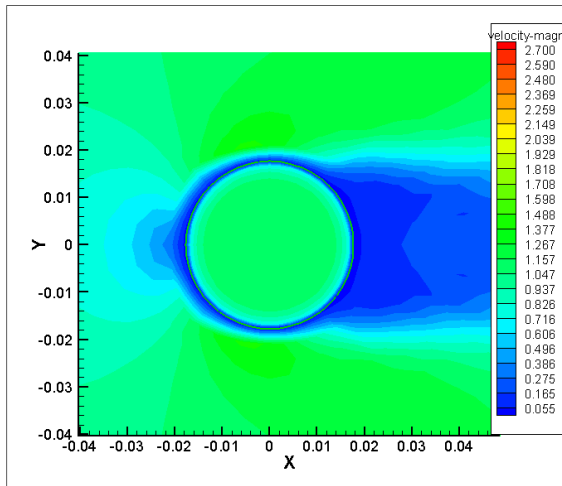
Caso 18, Corte em $Z=0,177$ m



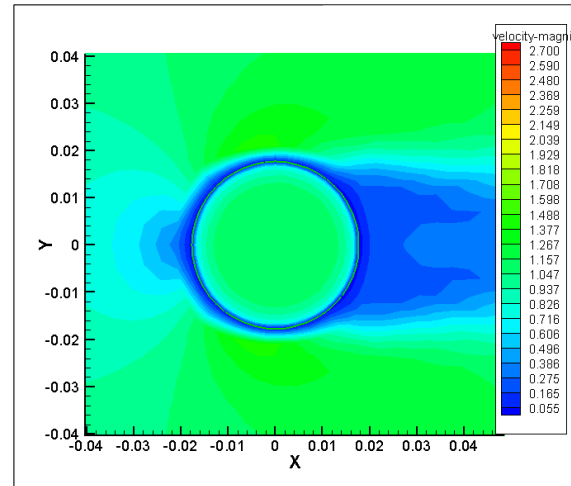
Caso 18, Corte em $Z=0,32$ m



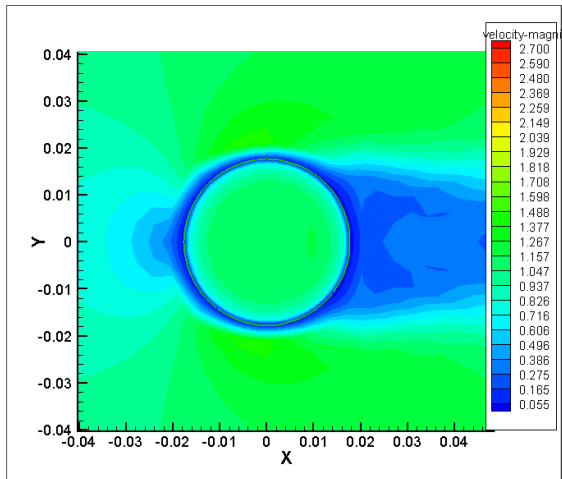
Caso 18, Corte em $Z=0,35$ m



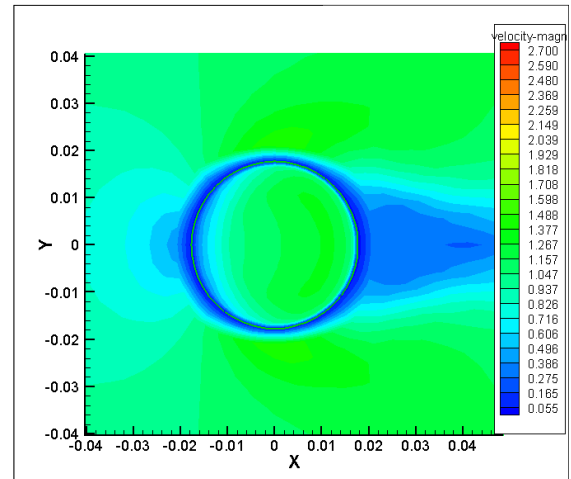
Caso 19, Corte em $Z=0,177$ m



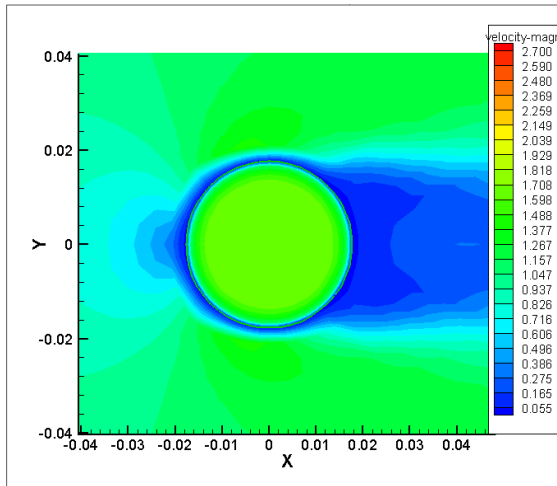
Caso 19, Corte em $Z=0,30975$ m



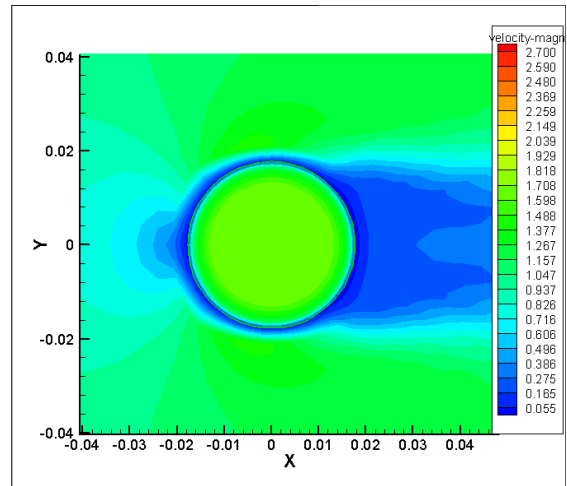
Caso 19, Corte em $Z=0,32$ m



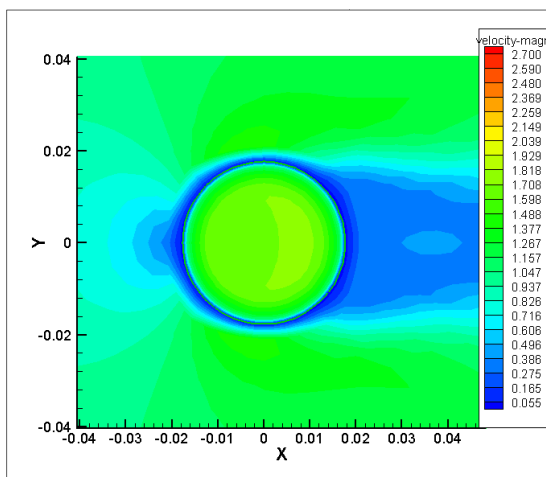
Caso 19, Corte em $Z=0,35$ m



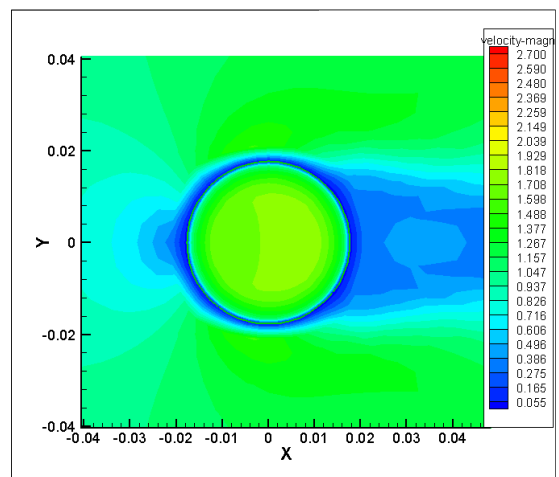
Caso 20, Corte em $Z=0.177$ m



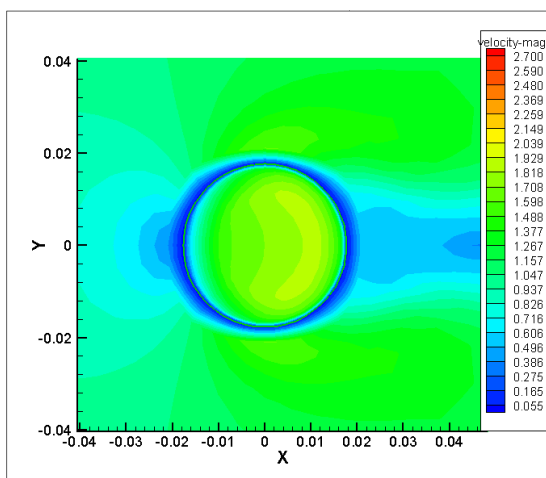
Caso 20, Corte em $Z=0.2655$ m



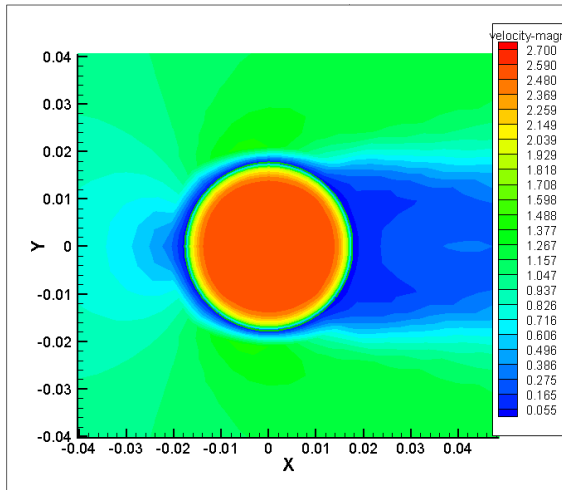
Caso 20, Corte em $Z=0.30975$ m



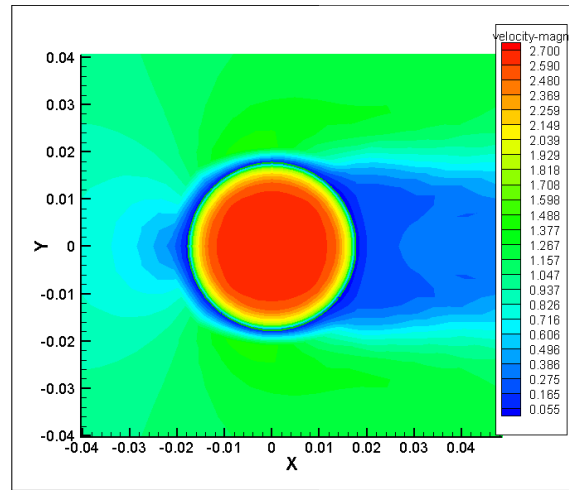
Caso 20, Corte em $Z=0.32$ m



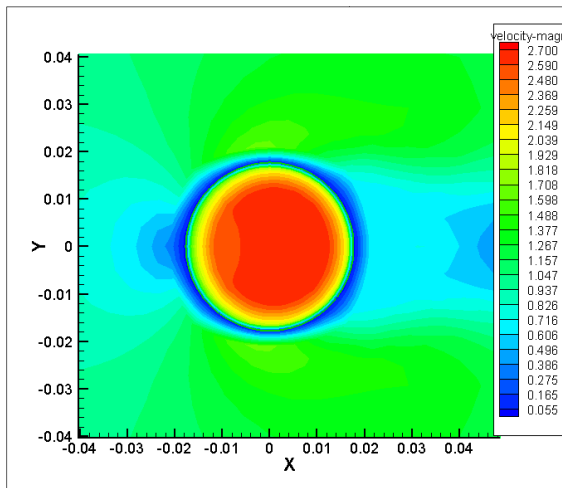
Caso 20, Corte em $Z=0.35$ m



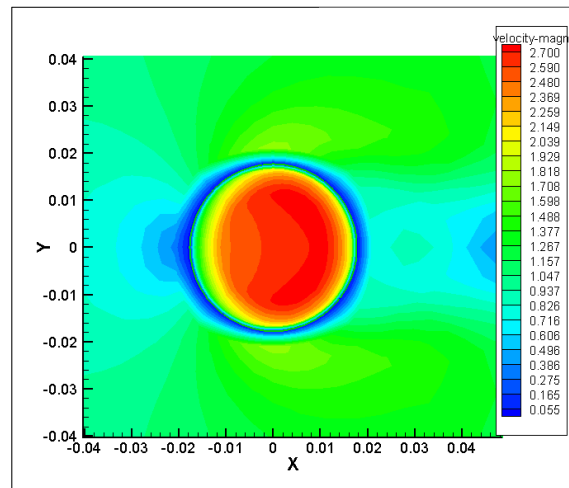
Caso 22, Corte em $Z=0,177$ m



Caso 22, Corte em $Z=0,2655$ m



Caso 22, Corte em $Z=0,34$ m



Caso 22, Corte em $Z=0,35$ m